

Funkbasierte energieautarke Kommunikation für Eisenbahngüterzüge

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von Dipl.-Ing. Thorben Kupke
aus Varel

eingereicht am: 13. November 2007

mündliche Prüfung am: 18. Dezember 2007

Referenten: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. E. Schnieder
 Prof. Dr.-Ing. J.-U. Varchmin

2008

Danksagung

Jede wissenschaftliche Arbeit ist unabhängig vom persönlichen Engagement des Doktoranden auf ein adäquates Arbeitsumfeld angewiesen. Während der Bearbeitung der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit zum Thema „Funkbasiertes Bussystem zur Nachrichtenübertragung im Eisenbahngüterverkehr“ wurde mir dies von der Siemens AG Transportation Systems TS RA D 8 in Braunschweig auf Initiative von Herrn Prof. Dr.-Ing. Varchmin, jedoch auch durch einen engen Kontakt zum Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Braunschweig ermöglicht.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. E. Schnieder, dem Leiter des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Braunschweig, für die Unterstützung und Förderung sowie die zahlreichen fachlichen Anregungen, Hinweise und Gespräche.

Herrn Prof. Dr.-Ing. J.-U. Varchmin, dem ehemaligen Leiter des Instituts für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik der Technischen Universität Braunschweig, danke ich für die Übernahme der Zweitgutachtertätigkeit sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Lemmer, dem Leiter des Instituts für Verkehrsführung und Fahrzeugsteuerung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Braunschweig, für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Weiterer Dank gilt Herrn Helmut Heike, dem Leiter des Fachbereichs TS RA D 8 der Siemens AG Transportation Systems in Braunschweig, der mit seinem Einsatz meine Promotion bei der Siemens AG ermöglicht hat, sowie Herrn Wolfgang Windolf für die Betreuung und allen Mitarbeitern für die zahlreichen fachlichen Diskussionen und Anregungen.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern Werner und Edith Kupke, meiner Lebensgefährtin Jennifer Lorenz, den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Braunschweig sowie allen Freunden, die mir stets den nötigen Halt während der Entstehung dieser Arbeit gaben und mit fachlichen Gesprächen zum Erfolg dieser Arbeit beitrugen.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	1
1.1	Ziele	1
1.2	Aufbau der Arbeit	2
2	Modelle von Entwicklungsprozessen und von Entwicklungsprodukten	5
2.1	Strukturierung des Systementwurfs	6
2.1.1	BMW-Prinzip der Systementwicklung	6
2.1.2	Modelle von Entwicklungsprozessen	7
2.1.3	Systementwicklung nach BASYSNET	13
2.2	Produktmodell	15
2.3	Bewertungsmethode des Paarweisen Vergleiches	17
2.4	Petrinetz-Werkzeuge	20
3	Ermittlung der Anforderungen	22
3.1	Methodische Anforderungsdefinition	22
3.2	Hauptanforderungen und Einsatzbereich	22
3.3	Dekomposition der Anforderungen	23
3.3.1	Allgemeine Anforderungen	24
3.3.2	Anforderungen an die Kommunikation	24
3.3.3	Anforderungen an die Energieversorgung	24
3.4	Querschnitt der Anforderungen	31
3.4.1	Anforderungen aus dem betrieblichen Einsatz	31
3.4.2	Technische Anforderungen	33
3.4.3	Funktionale Anforderungen	36
3.4.4	Zusammenfassende Darstellung	36
3.5	Grundsätzliche Systemstruktur	40
4	Stand der Technik	41
4.1	Studien und Forschungsprojekte	41
4.1.1	INTELFRET - Intelligent Freight Train	42
4.1.2	FEBIS - Freight Electronic Break and Information System	43
4.1.3	Machbarkeitsstudie IVSGV	45
4.1.4	TrainTalk	46

4.1.5	TrainLink	47
4.2	Marktreife Produkte	49
4.2.1	<i>ATIS MT</i>	49
4.2.2	<i>OPTIVIA</i>	50
4.3	Geschützte Verfahren und Patentansprüche	51
4.3.1	Datenübertragungseinrichtungen für einen Wagenverbund	51
4.3.2	Drahtlose Datenerfassung und Datenübertragung für ein zusammenhängendes mobiles System	51
4.4	Zusammenfassende Bewertung	52
5	Betriebliche Bedingungen und Energieversorgung	54
5.1	Güterbereiche und Transportentfernungen	56
5.1.1	Güterbereiche und Transportentfernungen im nationalen Umfeld	56
5.1.2	Güterbereiche und Transportentfernungen im internationalen Umfeld	57
5.2	Energiebedarfsabschätzung für Energieversorgung mit Primärbatterien	58
5.3	Energiebetrachtung für individuelle Fahrprofile	58
5.3.1	Szenario 1 - Shuttlezug einer Privatbahn am Beispiel des Germersheim-Shuttles der BASF AG	59
5.3.2	Szenario 2 - Einzelwagenverkehr auf Werks- und Normalstrecken am Beispiel eines Kesselwagens im Zugriff der BASF AG	61
5.3.3	Szenario 3 - Kombinierte Verkehr am Beispiel der rollenden Landstraße im internationalen europäischen Einsatz	63
5.3.4	Zusammenfassende Bewertung	65
5.4	Möglichkeiten der Energieversorgung auf Güterwagen	66
5.4.1	Anforderungen an Energiequellen und -erzeuger auf Güterwagen	66
5.4.2	Primärbatterien	66
5.4.3	Achsgeneratoren	67
5.4.4	Feder-Masse-Schwinger	67
5.4.5	Feder-Magnet-Schwinger	68
5.4.6	Seismischer Schwingmassengenerator	68
5.4.7	Luftdruckgenerator	68
5.4.8	Flügelwindräder	69
5.4.9	Savoniusrotoren	69
5.4.10	Solarzellen	70
5.4.11	Brennstoffzellen	72
5.4.12	Zusammenfassung und Bewertung der Energiequellen und -erzeuger	72
5.5	Möglichkeiten der Energiespeicherung	77
5.5.1	Anforderungen an Energiespeicher auf Güterwagen	78
5.5.2	Bewertung möglicher Energiespeicher	79
5.6	Exemplarische Dimensionierung eines Photovoltaiksystems	82
5.6.1	Komponenten einer Photovoltaikanlage	82
5.6.2	Dimensionierung von Photovoltaiksystemen	82

5.6.3	Dimensionierung des Photovoltaikgenerators unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit	85
5.6.4	Quantitative Dimensionierung einer Photovoltaikanlage in Abhängigkeit vom Nutzungsprofil	86
5.7	Zusammenfassung	88
6	Kommunikation	89
6.1	Technologische Grundlagen	90
6.1.1	Das ISO-OSI-Referenzmodell der Kommunikation	90
6.1.2	Topologische Grundstrukturen	91
6.1.3	Physikalische Eigenschaften der Funkkommunikation	92
6.2	Anforderungen an die Funkkommunikation	95
6.3	Funkbusse	96
6.3.1	Modulationsverfahren	96
6.3.2	Modulation durch Frequenzspreizung	97
6.3.3	Zugriffsstrategien	97
6.3.4	Einordnung der betrachteten Funktechnologien	99
6.3.5	Funktechnologien	101
6.4	Favorisierte Funkmodule	104
6.4.1	24XStream-Funkmodule der Firma <i>MaxStream</i>	104
6.4.2	XBee-PRO-Funkmodule der Firma <i>MaxStream</i>	104
6.5	Bewertung der Funktechnologien	105
6.6	Ermittlung und Validierung der Funkeigenschaften	107
6.6.1	Funkeigenschaften im Freifeld	107
6.6.2	Funkeigenschaften im Bahnumfeld	113
6.6.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	116
6.7	Auswahl der Topologie der Kommunikationsstruktur	117
6.8	Sichere Kommunikation	117
6.8.1	Bedrohungen	118
6.8.2	Schutzmaßnahmen zur Sicherung der Übertragung	119
6.8.3	Auswahl der Sicherungsmaßnahmen und der Nachrichtenstruktur	121
6.9	Telegrammtypen und Aufbau	122
6.9.1	Telegrammtypen und Auswahl	122
6.9.2	Telegrammaufbau	125
6.10	Zusammenfassung	128
7	Realisierung	130
7.1	Hardwarekonzept	131
7.1.1	Erweiterung der Anforderungen um Betriebsarten	131
7.1.2	Betriebsmodi eines Wagen-Kommunikationsgeräts	133
7.1.3	Betriebsmodi eines Lokomotiven-Kommunikationsgeräts	135
7.1.4	Ressourcen eines Kommunikationsgeräts	136
7.1.5	Komponenten	137

7.1.6	Energiebedarfsermittlung unter neuen Randbedingungen	140
7.2	Businitialisierung	144
7.2.1	Inauguration der Kommunikation	144
7.2.2	Plausibilitätsprüfung als Bestandteil der Inauguration	149
7.3	Modellierung, Softwarekonzept und Implementierung	151
7.3.1	Modell des Lokomotivengeräts	152
7.3.2	Modell des Wagengeräts	155
7.3.3	Kombination der Teilmodelle	158
7.4	Analyse des Modells	159
7.4.1	Analyse unter Verwendung erweiterter, generalisierter, stochastischer Petrinetze	160
7.4.2	Analyse unter Verwendung gefärbter Petrinetze	160
7.4.3	Analyse unter Verwendung einer Monte-Carlo-Simulation	161
7.4.4	Analysemöglichkeiten des Quellcodes per Monte-Carlo-Simulation	165
7.4.5	Bewertung der Analysemethoden	167
7.5	Softwareintegration und Codegenerierung	169
7.5.1	Ansatz zur Codegenerierung aus Design/CPN	169
7.5.2	Ansatz zur Codegenerierung aus II-Tool	172
7.5.3	Werkzeuge zur Softwareintegration	172
7.5.4	Softwaredesign und Implementierung	173
8	Zusammenfassung und Ausblick	175
8.1	Zusammenfassung	175
8.2	Ausblick	176
A	Petrinetze	177
A.1	Petrinetze als Beschreibungsmittel	177
A.1.1	Stellen-Transitions-Netze	178
A.1.2	S/T-Petrinetze mit Test- und Verbotskanten	178
A.1.3	Determinierte zeitbewertete Petrinetze	179
A.1.4	Stochastische Petrinetze	180
A.2	Analysemethoden von Petrinetzmodellen	181
A.2.1	Erreichbarkeitsanalyse	181
A.2.2	Software-Zuverlässigkeit	182
A.2.3	Analysemethoden der Verlässlichkeit	182

Abbildungsverzeichnis

1.1	Gliederung dieser Arbeit	4
2.1	Gliederung des zweiten Kapitels	5
2.2	Phasenmodell und BMW-Prinzip in der Systementwicklung	6
2.3	Systementwicklung nach dem erweiterten Wasserfallmodell	8
2.4	System- und Softwareentwicklung nach dem V-Modell	10
2.5	Produktentwicklung nach dem Spiralmodell nach [BOEHM 1988]	12
2.6	Methodische Systementwicklung nach Phasenmodell mit BMW-Prinzip nach [SCHNIEDER 1999]	14
2.7	TOP-Down Darstellung der Anforderungsklassifizierung nach [SCHNIE- DER 2007]	16
2.8	Kategorisierung der Systemeigenschaften	16
2.9	Klassifizierung von Kommunikationssystemen	17
2.10	Aufbau der Prioritätenmatrix des Paarweisen Vergleichs	18
2.11	Priorisierte Bewertung von Produkten oder Lösungsansätzen	19
2.12	Petrinetzwerkzeuge und deren Anwendungsbereiche	20
3.1	Komponenten des Gesamtsystems und deren Anforderungsklassen	24
3.2	Dekomposition der allgemeinen Anforderungen	25
3.3	Dekomposition der Anforderungen an das Subsystem Kommunikation (Teil 1)	26
3.4	Dekomposition der Anforderungen an das Subsystem Kommunikation (Teil 2)	27
3.5	Dekomposition der Anforderungen an das Subsystem Kommunikation (Teil 3)	28
3.6	Dekomposition der Anforderungen an die Energieversorgung (Teil 1) . .	29
3.7	Dekomposition der Anforderungen an die Energieversorgung (Teil 2) . .	30
3.8	Dekomposition der geometrischen Systemanforderungen aus dem be- trieblichen Einsatz	31
3.9	Dekomposition der Systemanforderungen an die Umweltbedingungen .	32
3.10	Dekomposition der energetischen Systemanforderungen	32
3.11	Dekomposition der Systemanforderungen an das Zeitverhalten	33
3.12	Dekomposition der Systemanforderungen an den Funkkanal	34
3.13	Dekomposition der geometrischen Systemanforderungen	34

3.14	Dekomposition der energetische Systemanforderungen	35
3.15	Systemanforderungen an das Zeitverhalten der Kommunikation	35
3.16	Dekomposition der funktionalen Basisanforderungen	36
3.17	Dekomposition der funktionalen Anforderungen an das Zeitverhalten	36
3.18	Top-Down-Darstellung der Systemdarstellung	37
3.19	Paradigmatische Darstellung des Lastenhefts als Lastenheftmatrix	39
3.20	Grundsätzliche Systemstruktur des Gesamtsystems	40
4.1	Bewertung des Stands der Technik bezüglich des Anforderungsquerschnitts	53
5.1	Wochenfahrprofil eines Ganzzuges für Szenario 1	61
5.2	Monatsfahrprofil eines Kesselwagens für Szenario 2	62
5.3	Wochenfahrprofil eines Wagens des Kombiverkehrs für Szenario 3	64
5.4	Übersicht der klassifizierten Anforderungen für Energiequellen und deren Werte	66
5.5	Eigenschaftenmatrix der Energiequellen und -erzeuger (Teil 1)	74
5.6	Eigenschaftenmatrix der Energiequellen und -erzeuger (Teil 2)	75
5.7	Priorisierung der Anforderungen für die Energiequellen und -erzeuger nach der Methode des „Paarweisen Vergleichs“	76
5.8	Gewichtete Bewertung der Energiequellen und Energieerzeuger	76
5.9	Übersicht der klassifizierten Anforderungen für Energiespeicher und deren Werte	78
5.10	Priorisierung der Anforderungen für die Energiespeicher nach der Methode des „Paarweisen Vergleichs“	80
5.11	Gewichtete Bewertung der Energiespeicher	80
5.12	Eigenschaftenmatrix der Energiespeicher	81
5.13	Typische Komponenten einer Photovoltaikanlage ohne Energiemanagement	82
5.14	Dimensionierung des Energiespeichers für verschiedene Nutzungsszenarien	86
5.15	Dimensionierung des Photovoltaikgenerators in Abhängigkeit vom Nutzungsszenario	87
5.16	Grundprinzipien der Energiewandlung und -erzeugung	88
5.17	Realisierungsvorschläge der Energieversorgung abhängig vom Einsatzszenario	88
6.1	Gliederung des Kapitels Kommunikation	89
6.2	Funkverbindungen der Stern-Topologie	91
6.3	Funkverbindungen der Bus-Topologie	91
6.4	Funkverbindungen der Topologie „Chained Cells“	92
6.5	Anforderungen an die Kommunikation	95
6.6	Betrachtete Funktechnologien	100
6.7	Priorisierung der Eigenschaften möglicher Funktechnologien nach der Bewertungsmethode des Paarweisen Vergleichs	105

6.8	Bewertungsmatrix möglicher Funktechnologien	106
6.9	Versuchsanordnung zur Reichweitenvalidierung entsprechend des MaxStream- Development-Kits	107
6.10	Skizze der Messumgebung 1	108
6.11	Messumgebung 1 in Flechtorf	109
6.12	Messergebnisse für die XBee-PRO-Module in Messumgebung 1	109
6.13	Messergebnisse für Messdurchlauf A der 24XStream-Module in Messum- gebung 1	110
6.14	Messergebnisse für Messdurchlauf B der 24XStream-Module in Messum- gebung 1	110
6.15	Skizze der Messumgebung 2	112
6.16	Teil 1 der Messumgebung 2 in Cremlingen	112
6.17	Teil 2 der Messumgebung 2 in Cremlingen	113
6.18	Messergebnisse für die 24XStream-Module in Messumgebung 2	113
6.19	Messumgebung 3 im Güterbahnhof Braunschweig	114
6.20	Messergebnisse für die 24XStream-Module im Bahnumfeld	116
6.21	Bedrohungs-Schutzmaßnahmenmatrix nach [EN50159-2 2002]	122
6.22	Auswahl einer Nachrichtenstruktur nach [EN50159-2 2002] entspre- chend der Randbedingungen	123
6.23	Modell der Nachrichtendarstellung innerhalb des Übertragungssystems (Typ A0 & A1) nach [EN50159-2 2002]	123
6.24	Modell der Nachrichtendarstellung innerhalb des Übertragungssystems (Typ B1) nach [EN50159-2 2002]	124
6.25	Mögliche Versionen des Übertragungsprotokolls und zugehörige Nach- richtentypen	126
7.1	Hard- und Softwarekomponenten eines Kommunikationsgeräts und Gliে- derung des Kapitels Realisierung	130
7.2	Kanal-Instanzen-Netz des Kommunikationsgeräts	131
7.3	Ressourcenübersicht eines Kommunikationsgeräts	137
7.4	24XStream Funktransceiver der Firma MaxStream	137
7.5	Crumb128-Modul der Firma chip45.com	138
7.6	GR-213 GPS-Empfänger der Firma Holux	139
7.7	Bachem-Neigungsschalter mit einem Schaltwinkel von 15°	139
7.8	Berechnung des Energiebedarfs pro Stunde unter den angenommenen Randbedingungen	142
7.9	Berechnung des Energiebedarfs unter den angenommenen Randbedin- gungen bezogen auf ein Revisionsintervall	143
7.10	Ausgangssituation der Inauguration	145
7.11	Kanal-Instanzen-Netz zum Ablauf der Kommunikation	146
7.12	Transitionsgesteuerte Synchronisierung der Teilmodelle	151
7.13	Abstrahiertes Modell des Lokomotivengeräts	153
7.14	Modell des Lokomotivengeräts	154

7.15	Abstrahiertes Modell des Wagengeräts	156
7.16	Modell des Wagengeräts	157
7.17	Modell des Übertragungskanals	158
7.18	Modell des Lokomotivengeräts inkl. realem Übertragungskanal zur Monte-Carlo-Simulation	163
7.19	Analyseansatz für die Monte-Carlo-Simulation unter Verwendung von Petrinetzen	165
7.20	Analyseansatz für die Monte-Carlo-Simulation unter Verwendung objektorientierter Programmierung	166
7.21	Bewertung der Analysemethoden mit Monte-Carlo-Simulation	168
7.22	Übersicht über die im Rahmen des AC/DC-Projekts entwickelten Methoden zur automatischen Codegenerierung	171
7.23	Vorgehen für die Codegenerierung aus einem TimeNET-Petrinetzmodell	172
7.24	Screenshot des Workspaces in Eclipse	173
A.1	Grundstruktur eines einfachen Petrinetzes	177
A.2	Schalten eines Stellen-Transitions-Netzes	178
A.3	S/T-Netze mit Test- und Verbotskanten	179
A.4	Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen	180

Tabellenverzeichnis

5.1	Anteil der Güterbereiche am Verkehrsaufkommen der DB Cargo [ALLES 1999]	56
5.2	Anteile der Verkehrsart am Schienengüterverkehr [ALLES 1999]	57
5.3	Mittlere Transportentfernungen im Schienengüterverkehr der DB Cargo [ALLES 1999]	59
5.4	Jahresnutzungsprofil für einen Ganzzug einer Privatbahn (Szenario 1) .	60
5.5	Jahresbetriebsprofil für einen Kesselwagen im Einzelwagenverkehr (Szenario 2)	62
5.6	Jahresbetriebsprofil für einen Wagen im Kombinierten Ganzzugverkehr (Szenario 3)	64
5.7	Energiebedarf pro Jahr in Abhängigkeit vom Einsatzszenario	65
5.8	Mittlerer Wirkungsgrad von Solarzellen je Typ [SOLARSERVER 2005] .	70
5.9	Bedeutung der Bewertungspunktzahlen für die gewichtete Bewertung .	73
6.1	Formelzeichen aus (6.1) und (6.2)	93
6.2	Formelzeichen aus (6.5)	95
6.3	Validierungsergebnisse in Messumgebung 1	111
6.4	Ergebnis für die 24XStream-Module in Messumgebung 2	111
6.5	Aufbau des SAHARA-Protokolls	124
6.6	Telegrammaufbau einer Nachricht entsprechend Telegrammtyp B1 der [EN50159-2 2002]	129
7.1	Relevante Werte für die Berechnung des Energiebedarfs	142
7.2	Zustandsraumanalyse mit II-Tool	161
7.3	Zustandsraumanalyse mit II-Tool für die Monte-Carlo-Simulation . . .	164

Abkürzungsverzeichnis

AAR	Association of American Railroads
AEG	Allgemeines Eisenbahngesetz
ASK	Amplitude Shift Keying - Amplitudenumtastung der Modulation
AVR	Bezeichnung der Familie der RISC-Prozessoren der Firma <i>ATMEL</i>
BASYSNET	Beschreibungs-, Analyse- und Systementwicklungsmethode auf der Grundlage von Petrinetzen
BMW	Beschreibungsmittel, Methode und Werkzeug
CAN	Controller Area Network
CAN	Feldbus Controller Area Network
CDMA	Code Division Multiple Access - Codemultiplex-Verfahren
CPN	Coloured Petrinets / gefärbte od. höhere Petrinetze
CRC	Cyclic Redundancy Check (zyklische Redundanzprüfung)
CSMA	Buszugriffsverfahren Carrier Sense Multiple Access
CSMA/CA	Buszugriffsverfahren Carrier Sense Multiple Access mit Kollisionsvermeidung
CSMA/CD	Buszugriffsverfahren Carrier Sense Multiple Access mit Kollisionserkennung
DB	Deutsche Bahn
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunication
DFD	Datenflussdiagramm
DoD	Depth of discharge
DSPNs	Deterministische, stochastische Petrinetze
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum - Frequenzspreizungsverfahren der Modulation
EBA	Eisenbahn-Bundesamt
EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung
ECPB	electronically controlled pneumatic brake system
EG	Erreichbarkeitsgraph
EGSPN	Erweitertes generalisiertes Stochastisches Petrinetz
EOT	End Of Train
ERRI	ehem. European Rail Research Institute (eingestellt am 30.06.2004)
ESTW	Elektronisches Stellwerk
FDMA	Frequency Division Multiple Access - Frequenzmultiplex-Verfahren

FEBIS	Freight Electronic Brake and Information System
FHSS	Frequency Spread Spectrum System - Frequenzsprungverfahren der Modulation
FSK	Frequency Shift Keying - Frequenzumtastung der Modulation
GCC	GNU C Compiler
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying, siehe FSK
GNU	General Public License
GSPN	Generalisiertes Stochastisches Petrinetz
HEU	Head End Unit
HF	Hochfrequenz
HMI	Human-Machine-Interface
IfRA	Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik der TU Braunschweig, heute <i>IVA</i>
INTELFRET	EU-Projekt ‘Intelligent Freight Train’
ISM-Band	Industrial, Scientific and Medical Band
ISO	International Standardization Organization
ISP	In-System Programmer
IVA	Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der TU Braunschweig
IVSGV	Machbarkeitsstudie ‘Individualisierter Schienengüterverkehr’
LON	‘Local Operating Network’ der Echelon Corporation, Palo Alto, USA
MMI	Mensch-Maschine-Interface
MRC	Multiple Ruled Chain
NMEA	National Marine Electronics Association (Nationale Vereinigung für Marineelektronik)
OOK	On-Off Keying - binäre Umtastung der Modulation
OSI	Open Systems Interconnection
PN	Petrinetz, petrinet
PSK	Phase Shift Keying - Phasenumtastung der Modulation
QPSK	Quadratur Phase Shift Keying, siehe PSK
RAM	Random Access Memory (flüchtiger Arbeitsspeicher)
RAMSS	Reliability, Availability, Maintainability, Safety, Security
RISC	Reduced Instruction Set Computing (Prozessoren mit reduziertem, schlanken Befehlssatz)
RMC	Recommended Minimum Sentence C (empfohlener Minimumdatensatz des NMEA-GPS-Protokolls)
ROM	Read Only Memory (nicht flüchtiger Speicher)
RUP	Rational Unified Process
SAHARA	Telegramm für die sichere und hochverfügbare Datenkommunikation über geschlossene Netze in ESTWs
SDMA	Space Division Multiple Access - Raummultiplex-Verfahren

SNCF	Société Nationale des Chemins de fer Français - Die Französische Staatsbahn
SPN	Stochastisches Petrinetz, stochastic petrinet
STN	Stellen-Transitions-Netz
TDMA	Time Division Multiple Access - Zeitmultiplex-Verfahren
TimeNET	timed net evaluation tool
UIC	Union Internationale des chemins de fer - Internationaler Eisenbahnverband
UWB	Ultra-Wideband
VDI	Verein deutscher Ingenieure

Kapitel 1

Motivation

1.1 Ziele

Es besteht seit langem das Ziel, Statusinformationen des Schienengüterverkehrs, speziell der Güterwagen eines Fahrverbandes, während der Fahrt, z.B. durch Diagnose- und Telematiksysteme für Wagen- und Ladungsdaten, zu erfassen und zur Auswertung an eine zentrale Stelle weiterzuleiten [RIECKENBERG 2004b]. Das Konzept des so genannten intelligenten Güterwagens umfasst primär die Übertragung von steuerungsrelevanten Statusmeldungen, wie Kesseldruck und -temperatur, Schwingungsüberwachung sowie sekundär die Übertragung von sicherheitsrelevanten Alarmen und Fehlermeldungen, wie Heißläuferortung, Entgleisungsdetektion und Zugtrennung.

Ansätze für kabelgebundene Informationssysteme auf Güterzügen wurden unter anderem im Projekt *TrainLink* erforscht [STEINBERG 2002, VARCHMIN und STEINBERG 2005, JASMER et al. 2004]. Dabei zeigte sich, dass das Buskabel des kabelbasierenden Bussystems in der rauen Umgebung des Schienengüterverkehrs trotz geeigneter Steckerverbindungen eine relativ hohe Fehleranfälligkeit z.B. aufgrund von Korrosion aufweist. Aus den Erfahrungen heraus erwuchs die Aufgabe der Untersuchung eines funkbasierenden, selbstkonfigurierenden Zugbusses mit energieautarken Wagengeräten, so dass auf eine durchgehende Kabelverbindung vollkommen verzichtet werden kann.

Die wichtigsten Ziele und Anforderungen für ein neues Bussystem sind somit die Realisierung energieautarker Wagengeräte mit minimalem Energiebedarf und die vollautomatische Konfiguration und Initialisierung des Zugbusses. Umgangssprachlich wird dies als Zugtaufe bezeichnet, wobei der Begriff streng genommen den Vorgang der Zusammenstellung eines Fahrverbandes im Zugbildungsbahnhof und der anschließenden mechanischen Kopplung der Wagen des Fahrverbandes untereinander bezeichnet. Zur Abgrenzung wird der Vorgang des organisatorischen Aufbaus des Funkbusses im Folgenden als *Inauguration* bezeichnet.

Das in dieser Dissertation entwickelte und zum Patent angemeldete Inaugurationsverfahren ist so flexibel, dass es nicht auf den Einsatz im Schienengüterverkehr begrenzt bleiben muss, sondern vielmehr für Fahrverbände im Allgemeinen anwendbar ist [KUPKE et al. 2007].

1.2 Aufbau der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit werden im Kapitel 2 zunächst Modelle von Entwicklungsprozessen und Entwicklungsprodukten zur Strukturierung des Systementwurfs analysiert und daraus eine Entwicklungsmethode für die vorliegende Fragestellung dargestellt, wobei Petrinetze als Beschreibungsmittel innerhalb der Modellbildungs- und Implementierungsphase entsprechend der Entwicklungsmethode nach dem Phasenmodell mit BMW-Prinzip (BASYSNET) verwendet werden (vgl. [SCHNIEDER 1999]).

In Kapitel 3 werden Anforderungen an das zu realisierende Kommunikationssystem aus der Ausgangssituation heraus analysiert und definiert. Dabei wurde nach Anforderungen aus dem betrieblichen Einsatz, nach technischen und nach funktionalen Anforderungen unterschieden und einerseits als Dekomposition (vgl. Abschnitt 3.3) und andererseits als Anforderungsquerschnitt (vgl. Abschnitt 3.4) entwickelt. Als Ergebnis liegt eine Top-Down-Darstellung der Eigenschaften, Merkmale und Größen der Systementwicklung und eine entsprechende paradigmatische Darstellung des Lastenhefts als Anforderungs- bzw. Lastenheftmatrix vor, an der Lösungsansätze zu bewerten sind.

Im Kapitel 4 wird der Stand der Entwicklungen und der Technik gegliedert nach Studien und Forschungsprojekten, nach marktreifen Produkten und nach geschützten Verfahren. Die Bewertung dieser Systeme, Modelle, Produkte und Verfahren erfolgt anhand der Eigenschaften und Merkmalen des Anforderungsquerschnitts. Es zeigte sich, dass aus aktueller Sicht kein System den Anforderungen, welche an das zu realisierende Kommunikationssystem gestellt wurden, gerecht wird und infolge dessen eine Neuentwicklung gerechtfertigt und sinnvoll ist.

Schlüsselanforderung ist die Realisierung einer autarken Energieversorgung, welche in Kapitel 5 behandelt wird. Ist diese mit einem angemessenen Kosten-Nutzen-Verhältnis nicht zu realisieren, so wäre dies ein Ausschlusskriterium für die weitere Systementwicklung. Es wurden daher die betrieblichen Bedingungen, d.h. exemplarisch die Güterbereiche anhand des Verkehrsaufkommens der DB Cargo analysiert und daraus drei Einsatzszenarien für Güterwagen abgeleitet. Dazu gehören die mittleren Transportentfernungen, die durchschnittlichen Fahr- und Standzeiten sowie die durchschnittliche Geschwindigkeit und die Frequenz der Fahrten. Anhand der drei Nutzungsszenarien wurde unter Annahme fiktiver Randbedingungen der Energiebedarf innerhalb eines Wartungsintervalls von Güterwagen abgeschätzt. Dazu wurden mögliche Energiequellen, d.h. Primärbatterien, und -erzeuger, d.h. elektrochemische, mechanische und pho-

photovoltaische Generatoren, und Energiespeicher untersucht und die Eigenschaften und Merkmale anhand der Dekomposition der Anforderungen aus Kapitel 3 bewertet. Dabei kam die Bewertungsmethode des Paarweisen Vergleichs zum Einsatz. Abschließend wurden Möglichkeiten der Energieversorgung mit Hilfe der Kombination eines Photovoltaikgenerators und eines Energiespeichers untersucht und eine mögliche Dimensionierung einer Photovoltaikanlage dargelegt.

Eine weitere Schlüsselanforderung an das zu realisierende Kommunikationssystem ist die Kommunikation an sich in Kapitel 6. Dazu wurden verfügbare Technologien analysiert und deren relevante Eigenschaften und Merkmale anhand der Anforderungen aus Kapitel 3 unter Nutzung der Methode des Paarweisen Vergleichs bewertet. Die Herstellerangaben der zwei ranghöchsten Technologien wurden anschließend in Freifeldversuchen und in einer Messung im Bahnumfeld in der Einfahrgruppe des Güterbahnhofs Braunschweig validiert. Es wurde eine geeignete Topologie ausgewählt und ein möglicher Telegrammaufbau zur Realisierung einer sicherheitsrelevanten Kommunikation erarbeitet.

Die Realisierungsphase in Kapitel 7 befasst sich schließlich mit dem Hardware- und dem Softwarekonzept sowie dem Kommunikationskonzept, welches mittels EGSPN modelliert und analysiert wurde. Aufgrund der Komplexität des zu untersuchenden Szenarios mit 1000 Wagengeräten und 40 Lokomotivgeräten war die Thematik der Vervielfältigung nicht trivial. Durch eine Monte-Carlo-Simulation unter Nutzung der Teilmodelle von Wagen- und Lokomotivgerät konnte der theoretische Funktionsnachweis erbracht und mittels einer Codegenerierung aus dem validierten Petrinetz-Teilmodellen ein C-Quellcode für die direkte Implementierung in dem Mikrocontroller erzeugt werden.

Die Gliederung dieser Arbeit ist Abbildung 1.1 zu entnehmen.

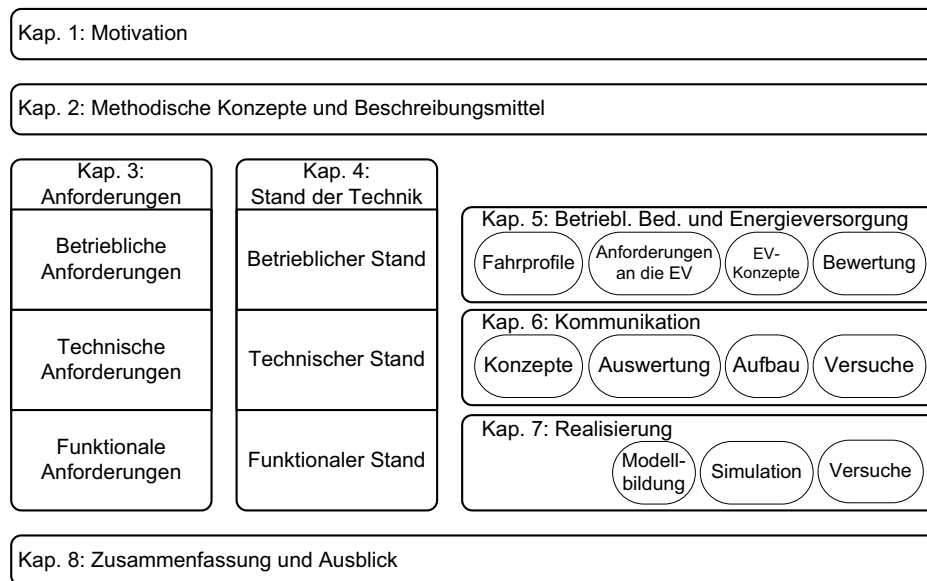


Abbildung 1.1: Gliederung dieser Arbeit

Kapitel 2

Modelle von Entwicklungsprozessen und von Entwicklungsprodukten

Die Modellbildung von Entwicklungsprodukten und der Entwicklungsprozess lassen sich entsprechend Abbildung 2.1 strukturieren. Aus der grundsätzlichen Strukturierung des Systementwurfs dieser Arbeit werden methodische Prozesse abgeleitet und über ein Eigenschaftsmodell das Produktmodell (vgl. Abschnitt 2.3) erarbeitet, nach welchem die Produktentwicklung erfolgen kann. In Abschnitt 2.4 werden Petrinetz-Werkzeuge vorgestellt.

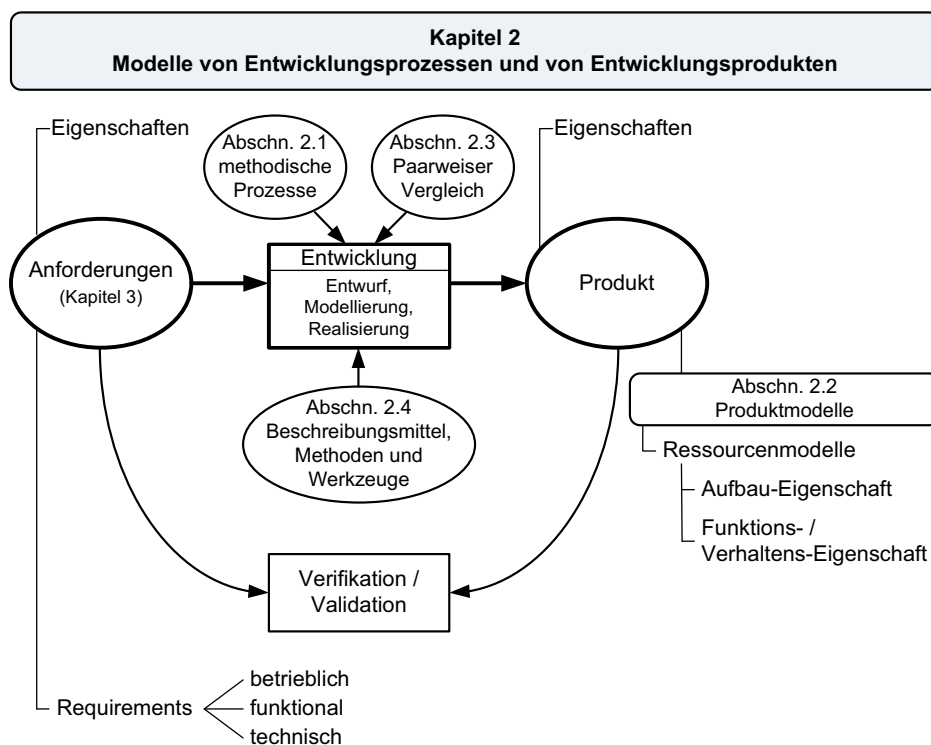


Abbildung 2.1: Gliederung des zweiten Kapitels

2.1 Strukturierung des Systementwurfs

Eine Automatisierungseinrichtung ist das Resultat des Systemengineerings, d.h. eines in der Regel phasenorientierten Prozesses. Die Systementwicklung, die dieser Arbeit zu Grunde liegt, lässt sich in die drei Phasen Anforderungsdefinition, Entwurf bzw. Realisierungskonzepte und Realisierung unterteilen. In allen Phasen kommen dabei Beschreibungsmittel, Methoden und Werkzeuge zum Einsatz [SCHNIEDER 1999].

2.1.1 BMW-Prinzip der Systementwicklung

Die als BMW-Prinzip bezeichnete methodisch-systematische Vorgehensweise der Systementwicklung ist von dem aufeinander abgestimmten Zusammenspiel von Beschreibungsmitteln, Methoden und Realisierungsmitteln, insbesondere Werkzeugen, nach dem Phasenmodell gekennzeichnet (vgl. Abbildung 2.2). Zwischen den Mitteln der Entwicklung bestehen Wechselwirkungen und Abhängigkeiten, die einzelnen Bestandteile sind jedoch eigenständig und in weiten Teilen orthogonal zueinander [SCHNIEDER 1999].

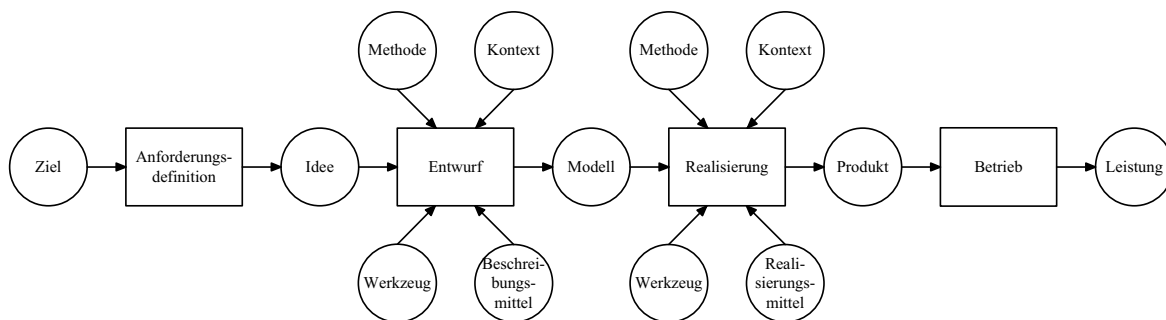


Abbildung 2.2: Phasenmodell und BMW-Prinzip in der Systementwicklung

Beschreibungsmittel sind in jedem Fall essentielle Voraussetzungen zur Formulierung der Vorgehensweise, der Aufgabenstellung sowie deren Lösung und ihrer Realisierungsmittel und zur Bedienungshandhabung. Methoden und Werkzeuge zu ihrer Entwicklung sind nicht unbedingt notwendig.

Der methodische Entwurf unterscheidet sich vom häufig handwerklich-intuitiv praktizierten oder industriell-werkzeuggestützten Entwurf durch die explizite Anwendung eines heuristisch-empirischen Regelsystems. Ohne unterstützende Werkzeuge ist der Einsatz von Beschreibungsmitteln und Methoden bei allen Tätigkeiten im Lebenszyklus nur begrenzt von Nutzen. Notwendigerweise beziehen sich die Werkzeuge auf bestimmte Beschreibungsmittel und verkörpern die technische Umsetzung von Methoden. Elementare Aufgaben von Werkzeugen sind z.B. die Dokumentationsunterstützung mit Editierung, Archivierung, Dokumenten- und Versionsverwaltung, Volltextsuche usw.

Zur Verdeutlichung des Zusammenhangs seien hier die sinngemäßen Definitionen der VDI-Richtlinie 3682 erwähnt [VDI3682 2005]:

- Ein **Beschreibungsmittel** beschreibt in grafischer Form bestimmte Sachverhalte zur visuellen Wahrnehmung und Speicherung. Es umfasst alphanumerische Zeichen, Symbole oder sonstige graphische Darstellungselemente (Semiotik) sowie Konventionen über deren Kombination (Syntax). Den einzelnen Darstellungselementen, ihren Kombinationen und Zuordnungen werden bestimmte Bedingungen oder Konzepte aus einem bestimmten fachlichen Kontext zugeordnet, die mehr oder weniger detailliert und formal spezifiziert sind (Semantik).
- Eine **Methode** ist eine auf einem Regelsystem aufbauende Vorgehensweise, nach Sache und Ziel planmäßig, zur Erlangung von Erkenntnissen und praktischen Ergebnissen.
- Ein **Werkzeug** dient der Unterstützung des Menschen bei oder während der Herstellung von Ergebnissen. Heute wird der Begriff „Tool“ meist als durch Rechensysteme (Hard-/Software) realisiert verstanden.

2.1.2 Modelle von Entwicklungsprozessen

Ein Modell bildet nach allgemeinem Verständnis eine anwendungsorientierte Sicht auf die Realität ab, d.h. relevante Eigenschaften werden erfasst, andere Eigenschaften werden dagegen nur verkürzt dargestellt, so dass die Beschreibung einen bestimmten Sachverhalt darstellt, dem Erkenntnisgewinn dient oder das reale System ersetzt.

Strukturierte Analyse

Prozesse können durch unterschiedliche Ansätze gegliedert und beschrieben werden [KIEFER 1995]. Die strukturierte Analyse (*SA*) hat sich seit den Anfängen in der Mitte der 1970er Jahre als eine wichtige Standardmethode der Systemanalyse durchgesetzt. Ziel ist die Erstellung eines Modells, das sowohl die Einordnung in den Gesamtzusammenhang als auch Systemdetails zeigt.

Die Vorteile der *SA* sind die graphische Modellnotation, die präzise Definition von Bedeutung, Zusammenhang und Funktionsweise in Funktionalität und Datenstruktur sowie die einfache Integration von Anwenderwissen in das Modell, wodurch mehrdeutige, schlecht überprüfbare Spezifikationen im Fließtext vermieden werden. Es werden unterschiedliche Strategien zur Zerlegung unterschieden:

- Bei der **funktionsorientierten Zerlegung** wird das Gesamtsystem durch eine Top-Down-Zerlegung untergliedert und die Beschreibung verfeinert.
- Bei der **essentiellen Zerlegung** des Gesamtsystems steht die Analyse der Ziele im Vordergrund. Hierbei werden die zu behandelnden Ereignisse aufgelistet.

- Die **ereignisorientierte Zerlegung der Funktionalität und objektorientierte Zerlegung** vereint beide Ansätze, wodurch ein klarer und nachvollziehbarer Systemaufbau mit allerdings großen Datenkatalogen entsteht.

Wasserfallmodell der Systementwicklung

Traditionell erfolgt die strukturierte Systementwicklung durch eine funktionsorientierte Zerlegung nach dem Wasserfallmodell (vgl. Abbildung 2.3). An die Spezifikationsphase, also das Requirements Engineering, schließen sich der Entwurf, die Implementierung, der Test und der Betrieb an, wobei jeweils Rückkopplungen aufgrund von Änderungen zur nächsthöheren Ebene vorgesehen sind. Der Vorteil des Wasserfallmodells liegt dabei, neben dem durch die Einfachheit bedingten geringen Managementaufwand, im klaren Top-Down Vorgehen, welches Systeme strukturiert aus dem Abstrakten herleitet und so das Zusammenwirken der Systembestandteile exakt beschreibt, jedoch die Implementierungsdetails vernachlässigt [ROYCE 1970].

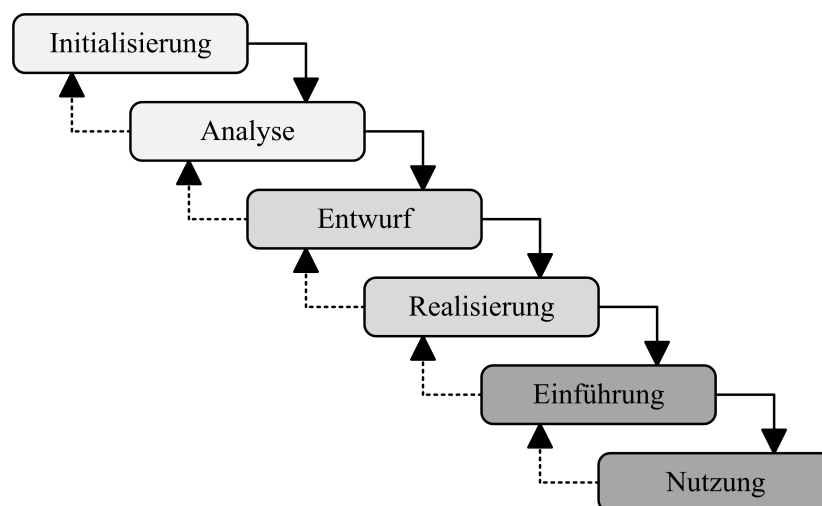


Abbildung 2.3: Systementwicklung nach dem erweiterten Wasserfallmodell

Der komplementäre Bottom-Up-Ansatz beschreitet den entgegengesetzten Weg und schafft eine Basis durch Entwicklung von Prototypen zur Problemlösung oder eines Kerns (Nukleus), der zu Beginn essentielle Kernfunktionen erfüllt und schalenartig erweitert wird. Gerade in der Startphase bietet dieser Ansatz somit die größten Freiheiten bezüglich der Realisierung, stellt aber bei der Erweiterung dieser detailliert ausgeführten Kerne oder Module ein Problem dar, da die gewünschte Gesamtstruktur nur mit hohem Aufwand und strukturellen Schwächen erreicht werden kann und nachträgliche konzeptionelle Modifikationen lediglich mit großem Aufwand möglich sind.

Als Beispiel im Kontext dieser Arbeit sei hier neben [KIEFER 1995, SCHROM 2003] auf [BIKKER und BOCK 1999] verwiesen. Beschrieben wird eine Methode zur Bewer-

tung und Spezifikation für Bussysteme auf Basis einer Top-Down-Modellierung und einer Bottom-Up-Simulation, wobei der Untersuchungsgegenstand weniger die Hardware-orientierten Schichten 1 (Physical Layer) und 2 (Data Link Layer) des ISO/OSI-Referenzmodells waren, sondern eine flexible modularisierte Simulation und Evaluation durch ein Referenzmodell, welches einer mathematischen Leistungsanalyse vorgezogen wurde. Die Ausprägung aller zu realisierenden Dienste konnte zu Beginn nicht umfassend abgeschätzt werden, jedoch sollte die Systemkonzeption ein offenes System ermöglichen. Für den Entwurf eines Anwendungsprotokolls wird ein Lösungsvorschlag gegeben, welcher der Entwicklung auf Basis eines Prozessmodells nach dem erweiterten Wasserfallmodell methodische Grundlage gibt.

Forschungsgegenstand war das Rationalisierungspotenzial für die grenzüberschreitende Interoperabilität des spurgebundenen Verkehrs in Europa bei der Nutzung der vorhandenen Gleiskapazitäten durch Einführung elektronisch gesteuerter Bremssysteme in Verbindung mit automatischen Zugkupplungen. Mit Hilfe der Strukturierten Analyse wurden die komplexen Zusammenhänge in einer hierarchischen Top-Down-Modellierung mit Hilfe von Datenflussdiagrammen (*DFD*) dargestellt. Zusammenhänge zwischen den Funktionen wurden dabei in graphischer Form mittels Petrinetzen visualisiert. Ausgehend von diesem erstellten Referenzmodell wurde das amerikanische, elektronisch gesteuerte pneumatische (ECP-)Bremssystem hinsichtlich realisierter Funktionen untersucht.

In [BIKKER und BOCK 1999] wurden Schlussfolgerungen und Ergebnisse dargelegt, welche losgelöst vom technischen Konzept des Systems zu sehen sind und sich aus dem methodischen Vorgehen ergeben:

- Durch die formale Modellierung werden Spezifikationslücken erkannt.
- Durch den modularen Aufbau lassen sich leicht Komponenten wie das Bussystem oder Businterfaces austauschen oder zusätzliche Busteilnehmer modellieren/integrieren.
- Die Beschreibung einer möglichen Realisierung kann durch eine Modellschablone (Referenzmodell) beurteilt werden.
- Im Vordergrund der Modellierung steht die Applikation und nicht das Übertragungssystem.
- Das Modell kann als Grundlage hinsichtlich Standardisierung genutzt werden. In weiteren Schritten kann das erstellte Referenzmodell zu einem Anwendungsprotokoll erweitert werden.

Das Anwendungsbeispiel zeigt, dass der Entwurf komplexer Systeme durch formale Beschreibung und Nutzung von Toolumgebungen effektiver gestaltet werden kann. Aufgrund der fehlenden Werkzeugkooperation während des Entwicklungsprozesses kann

es jedoch durch Transformationsprozesse zu Informationsverlusten oder sogar Fehlern kommen.

V-Modell der Systementwicklung

Im Bereich der IT-Systementwicklung hat sich das V-Modell als eine abstrakte, umfassende Projektmanagement-Struktur durchgesetzt, welche sich in einer V-Form der Projektelemente, wie IT-Systemdefinitionen und Tests, gegliedert nach ihrer groben zeitlichen Position und ihrer Detailtiefe, darstellen lässt (vgl. Abbildung 2.4). Das V-Modell hat einen militärischen Ursprung und wurde 1986 vom Bundesministerium für Verteidigung in zwei Projekten entwickelt. Die Ziele waren, die Kosten über den gesamten Softwareentwicklungs- und -pflegeprozess transparent zu gestalten und in Folge auch zu begrenzen, durch geeignete Maßnahmen einen Mindeststandard für Softwarequalität zu garantieren bzw. diesen weiter zu verbessern, durch Vergleichbarkeit der Angebote von Dritten eine größere Unabhängigkeit von einzelnen Anbietern zu erlangen sowie die Entwicklung von Software im eigenen Hause zu standardisieren und transparenter zu gestalten.

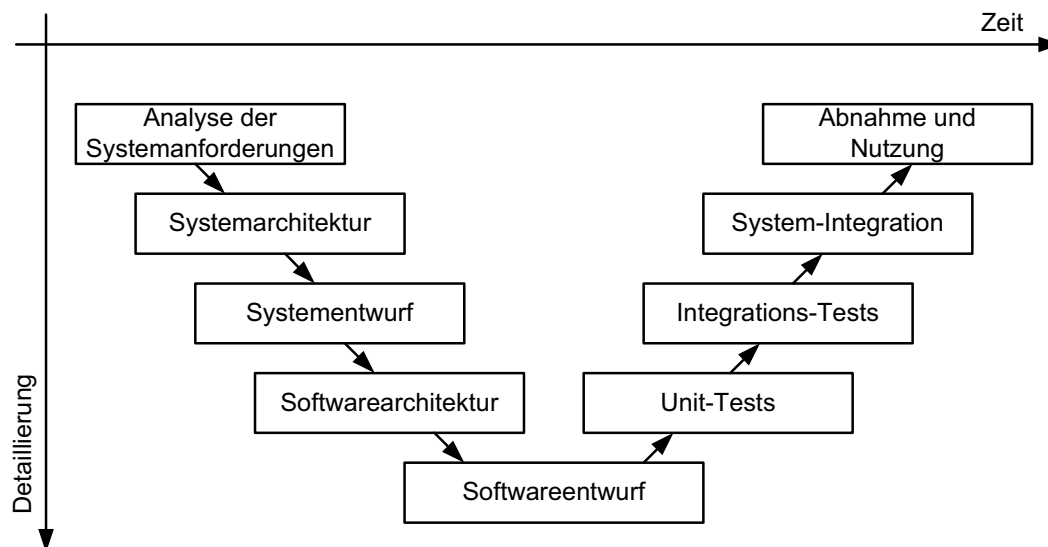


Abbildung 2.4: System- und Softwareentwicklung nach dem V-Modell

Neue Softwareentwicklungsansätze (z.B. Objektorientierung, etc.) waren der Grund für eine Überarbeitung, da das V-Modell bis zu diesem Zeitpunkt sehr stark auf den „klassischen Softwareentwicklungsansatz“ zugeschnitten war. Im Juni 1997 wurde das V-Modell '97 als Ergebnis veröffentlicht, welches seitdem für jegliche Softwareentwicklung in der Bundesverwaltung zur Anwendung empfohlen wurde [KBST 2006].

Im Februar 2005 wurde das V-Modell '97 im Zuge von neuen Erkenntnissen in der Softwareentwicklung durch die Version 1.0 des V-Modell XT (XT = Extreme Tailo-

ring) ersetzt, wobei die Hauptänderungspunkte die Anpassbarkeit an die jeweiligen Bedürfnisse (tailorbar), die Einbindung des Auftraggebers sowie die stärkere Modularisierung sind, d.h. die vier bisherigen Submodelle wurden durch Vorgehensbausteine ersetzt, aus denen das konkrete Vorgehensmodell eines Projekts zusammengestellt wird („tailoring“). Des weiteren stehen agile und inkrementelle Ansätze stärker im Fokus.

Im Gegensatz zum „Rational Unified Process“ (*RUP*) stehen im V-Modell nicht die Dokumentation sondern die Produkte im Vordergrund. Im Vergleich zu einem klassischen Phasenmodell werden im V-Modell keine strikte zeitliche Abfolge und insbesondere keine typischen Abnahmen, die ein Phasenende definieren, gefordert, sondern Aktivitäten und Ergebnisse definiert. Dennoch lassen sich die Aktivitäten des V-Modells z.B. auf ein Wasserfallmodell oder ein Spiralmodell abbilden [KBST 2006].

Vorgehensmodelle werden zur Anwendungsentwicklung von IT-Systemen verschiedenster Größe und Komplexität verwendet. Um bei Abwicklung kleinerer und mittlerer Projekte keinen übermäßig großen Mehraufwand zu produzieren, definiert das V-Modell für diese Projektgrößen Rationalisierungsmöglichkeiten durch Reduzierung der Menge der Aktivitäten und Produkte auf das notwendige Maß. Den Vorgang des Anpassens des V-Modells auf die projektspezifischen Bedürfnisse bezeichnet man als Tailoring.

Spiralmodell der Systementwicklung

Das generische Spiralmodell (vgl. Abbildung 2.5) der Systementwicklung fasst den Entwicklungsprozess, vornehmlich der Softwareentwicklung, als iterativen Prozess auf, wobei jeder Zyklus in den einzelnen Quadranten folgende Aktivitäten enthält [BALZERT 1998]:

1. Festlegung von Zielen, Identifikation von Alternativen und Beschreibung von Rahmenbedingungen
2. Evaluierung der Alternativen und das Erkennen, Abschätzen und Reduzieren von Risiken
3. Realisierung und Überprüfung des Zwischenprodukts bzw. Zwischenergebnisses
4. Planung des nächsten Zyklus der Projektfortsetzung

Das iterative Spiralmodell ist eine von [BOEHM 1988] erarbeitete Weiterentwicklung des sequentiellen Wasserfallmodells, in dem die Phasen mehrfach durchlaufen werden. Es bietet sich bei Projekten mit vielen offenen Randbedingungen an, da bei der Projektleitung jederzeit und in jede Richtung eingegriffen werden kann. Am Ende jeder Spirale steht ein Betrachten des Projektfortschritts (Review), wobei auch der Projektfortgang geplant und verabschiedet wird.

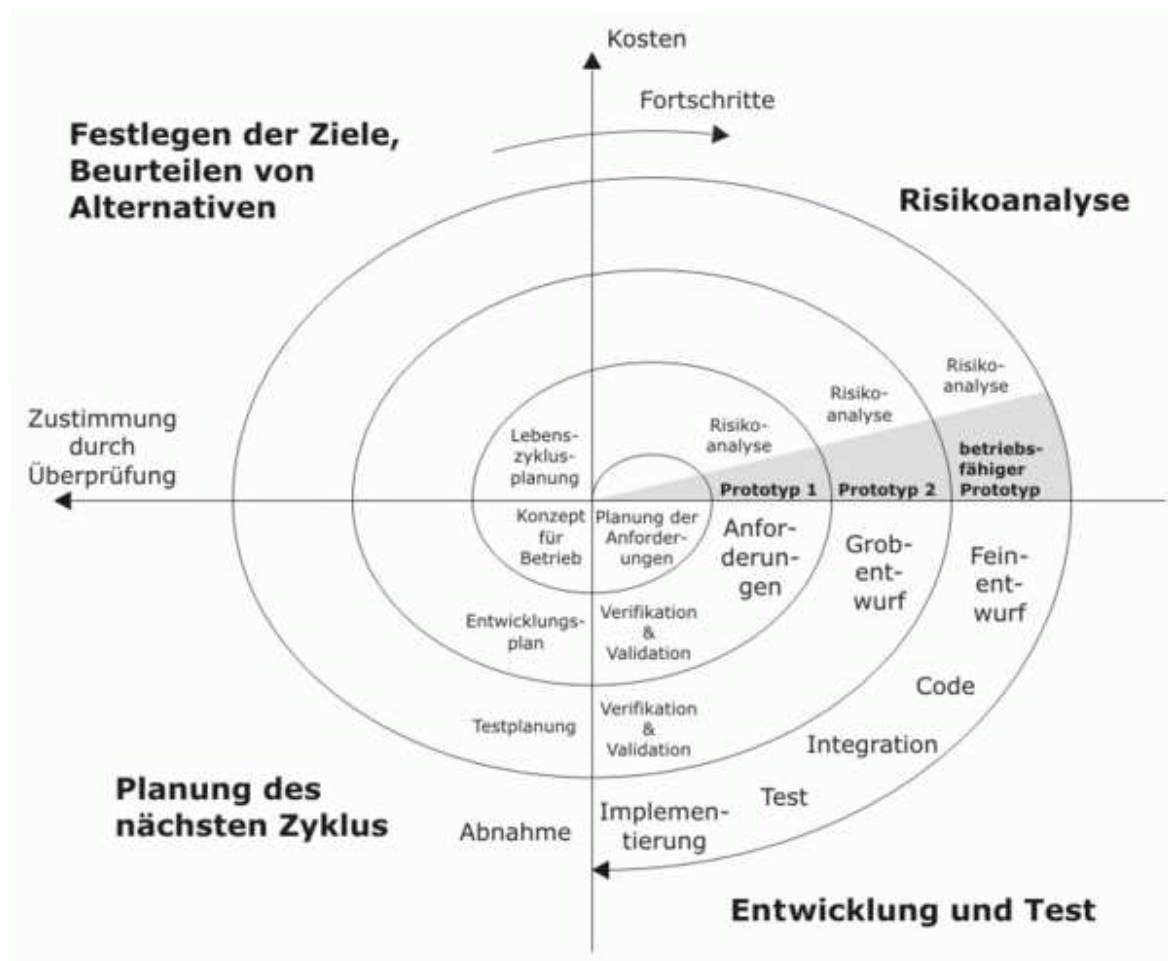


Abbildung 2.5: Produktentwicklung nach dem Spiralmodell nach [BOEHM 1988]

2.1.3 Systementwicklung nach BASYSNET

Alle zu realisierenden Aufgaben können zu Beginn eines Systementwurfs nicht vollständig festgelegt werden, auch wenn eine Vielzahl von allgemeinen Anforderungen an ein System bereits formuliert sind. Für die Realisierung komplexer Systeme in der Automatisierungstechnik ist eine vorausgehende Modellierung, z.B. in Form eines Ressourcenmodells, sinnvoll. Dadurch lässt sich ein leicht verständliches aber exaktes Abbild des zu realisierenden Systems erstellen. Das Funktionsmodell erfasst die funktionalen Zusammenhänge innerhalb eines Systems. Im Aufbau- oder Implementierungsmodell werden erste Schritte zum gerätetechnischen Aufbau unternommen.

Anhand von Eigenschafts- und Anforderungsmatrizen aus diesem Vorgehen ergibt sich die Entscheidungsentropie. Dies mündet später in ein validierbares Pflichtenheft, nach dem unmittelbar die Systementwicklung erfolgen kann. Die Entscheidungsentropie beruht auf der Methode des *Paarweisen Vergleichs*, einer aus dem Qualitätsmanagement bekannten Methode zur objektiven Entscheidungsfindung [HEINEN 1983, KIRSTEIN 1994].

Die hier verwendete methodische Systementwicklung kann als eine Entwicklung nach BASYSNET interpretiert werden [SCHNIEDER 1999]. Dabei erfolgt hier jedoch nicht die gesamte Systementwicklung mit Petrinetzen, sondern lediglich das Kommunikations- sowie das Softwarekonzept. Das Vorgehen von der Idee bis zum Produkt ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

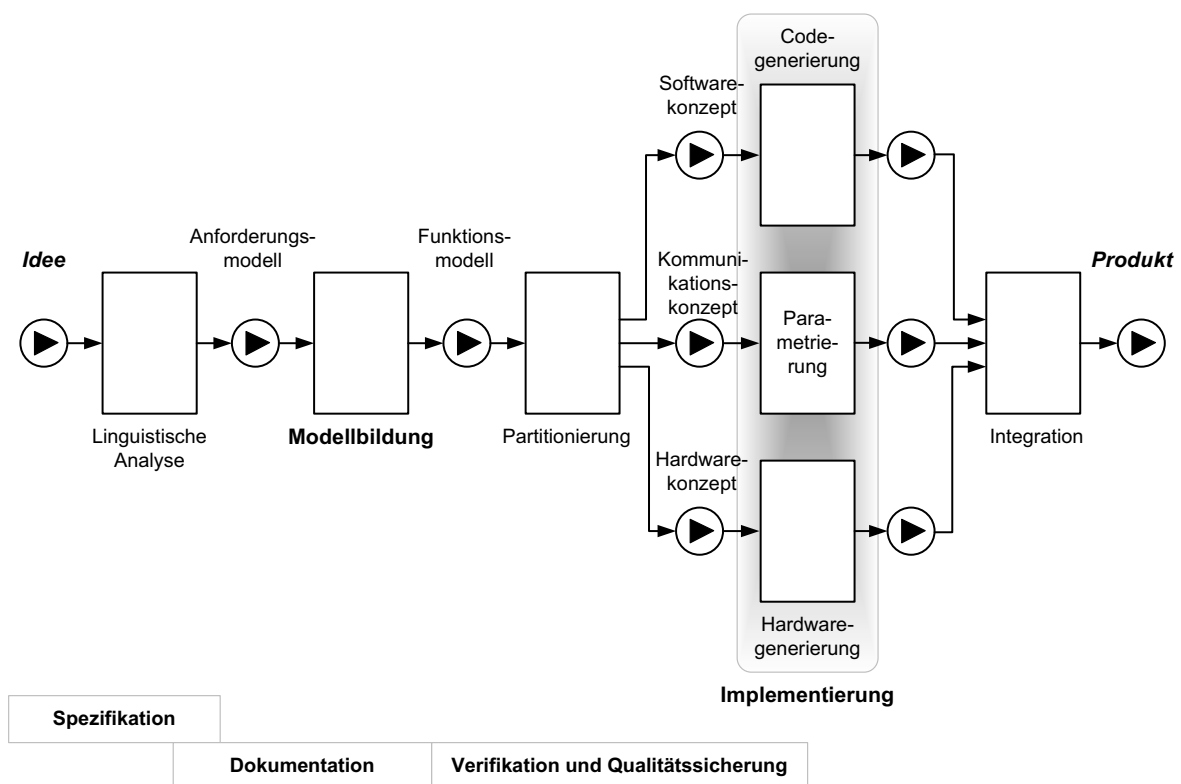


Abbildung 2.6: Methodische Systementwicklung nach Phasenmodell mit BMW-Prinzip nach [SCHNIEDER 1999]

2.2 Produktmodell

Aufgrund der Integration in einen industriellen Entwicklungsprozess nach einem klassischen Top-Down-Vorgehen, darf in der Systementwicklungsphase des Requirement Engineerings meist nicht auf die Erstellung einer pragmatischen, natürlichen Beschreibung der Anforderungen verzichtet werden. Für eine wissenschaftliche Bearbeitung der Problemstellung ist jedoch eine paradigmatisch-systemorientierte Darstellung von Struktur, Dekomposition, Kausalität und Temporalität des Systems besser geeignet. Das Lastenheft wird in einer Requirementstabelle bzw. -matrix komprimiert, so dass spätere Arbeitsansätze z.B. mit der Methode des *Paarweisen Vergleichs* unmittelbar mit dieser Matrix bewertet werden können (vgl. Abschnitt 2.3).

Aus definierten Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt entsteht in der Entwicklungsphase ein Produktmodell, aus welchem das Produkt entwickelt und an dem es validiert wird. Das Produktmodell entspricht dem Ressourcenmodell und lässt sich in die Aufbaueigenschaften und in die Funktions- bzw. Verhaltenseigenschaften gliedern [SCHNIEDER 1999].

Schnieder definiert das Ressourcenmodell wie folgt: „Das Ressourcenmodell modelliert Teile des Automatisierungssystems, die Prozessbeeinflussung (Aktorik) und -erfassung (Sensorik) und die Informationsverarbeitung zur Prozesssteuerung sowie die für die geforderte Leistung notwendigen betrieblichen, technischen, funktionalen und menschlichen Ressourcen“. Selbst das dynamische und das Verlässlichkeitsverhalten sind modellierbar [SCHNIEDER 1999]. Die für die Beurteilung der möglichen Ressourcen notwendige Detaillierung des Ressourcenmodells erfolgt in Kapitel 3 dieser Arbeit.

Die betriebliche, technische und funktionelle Modellbildung ist Teil der Requirements Engineering Phase. Innerhalb dieser werden betriebliche Anforderungen an das System bzw. die dem System vom Betrieb oder Umfeld aufgeprägten Eigenschaften definiert, Ansätze zum automatischen Aufbau der Kommunikationsstruktur und die daraus resultierenden technischen und funktionalen Anforderungen an das Kommunikationssystem erarbeitet, in Form von Relationsmatrizen komprimiert sowie anhand der Lastenheftmatrix bewertet.

Zur Erstellung des Ressourcenmodells bietet sich die Verwendung des Beschreibungsmittels der Petrinetze und die Erstellung eines Verhaltensmodells mittels der Petrinetze zu Beginn der Implementierungsphase an. In der Vergangenheit wurden bereits Betrachtungen zur simulationsfähigen Modellbildung, sowie automatischen Codegenerierung durchgeführt [SCHROM 2003] und die Zuverlässigkeitsbetrachtung integriert [SLOVÁK 2006].

Die Petrinetz-Strukturen bilden im Wesentlichen die Funktionsstruktur ab, d.h. bei Software die Programmflüsse, wozu lediglich die Befehle in Netzstrukturen transfor-

miert werden, die den Programmfluss beeinflussen. Befehle, die der Datenmanipulation dienen, werden nicht modelliert und später innerhalb der Transitionen implementiert. In [SCHROM 2003] werden Methoden für die Überführung von Funktionen in Petrinetze aufgezeigt.

Aus einer offen gestellten Aufgabenbeschreibung mit rudimentären Zielen und Randbedingungen heraus werden die Anforderungen (Lasten) mittels einer iterativen Entwurfsmethode zu einer hierarchischen Darstellung geformt (vgl. Abbildung 2.7). Als Beschreibungsmittel wird anlehnd an die VDI-Richtlinie 3682 [VDI3682 2005] eine klassendiagrammartige Struktur verwendet.

Aus den Hauptanforderungen an das System und dem Kontext lassen sich die Systemanforderungen grob in betriebliche, technische und funktionale Anforderungen untergliedern (vgl. Abbildung 2.8). Die Verfeinerung der Hauptanforderungen erfolgt in Kapitel 3.

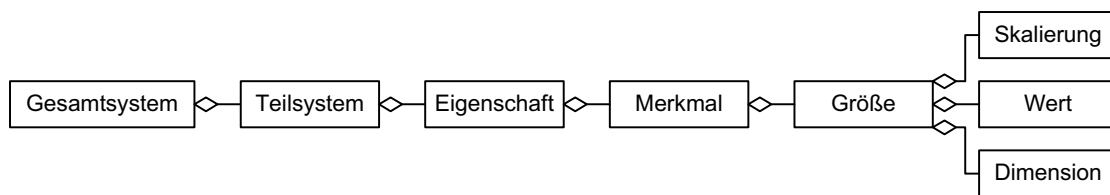


Abbildung 2.7: TOP-Down Darstellung der Anforderungsklassifizierung nach [SCHNIEDER 2007]

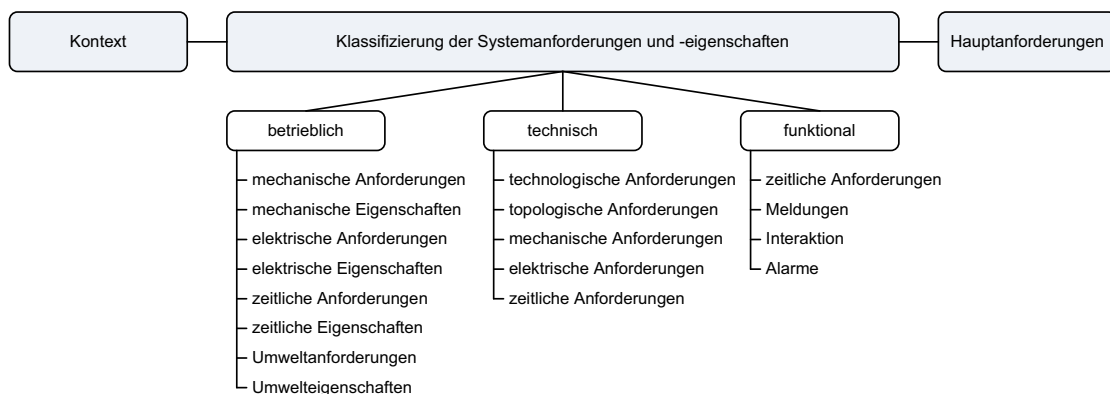


Abbildung 2.8: Kategorisierung der Systemeigenschaften

In [KUPKE 2006] wurde eine formalisierte Prozessbeschreibung nach [VDI3682 2005] für das Kommunikationssystem erarbeitet (vgl. Abbildung 2.9). Das Gesamtsystem setzt sich neben dem Kommunikationssystem aus weiteren Teilsystemen zusammen, die sich analog dekomponieren lassen (vgl. Abschnitt 3.5).

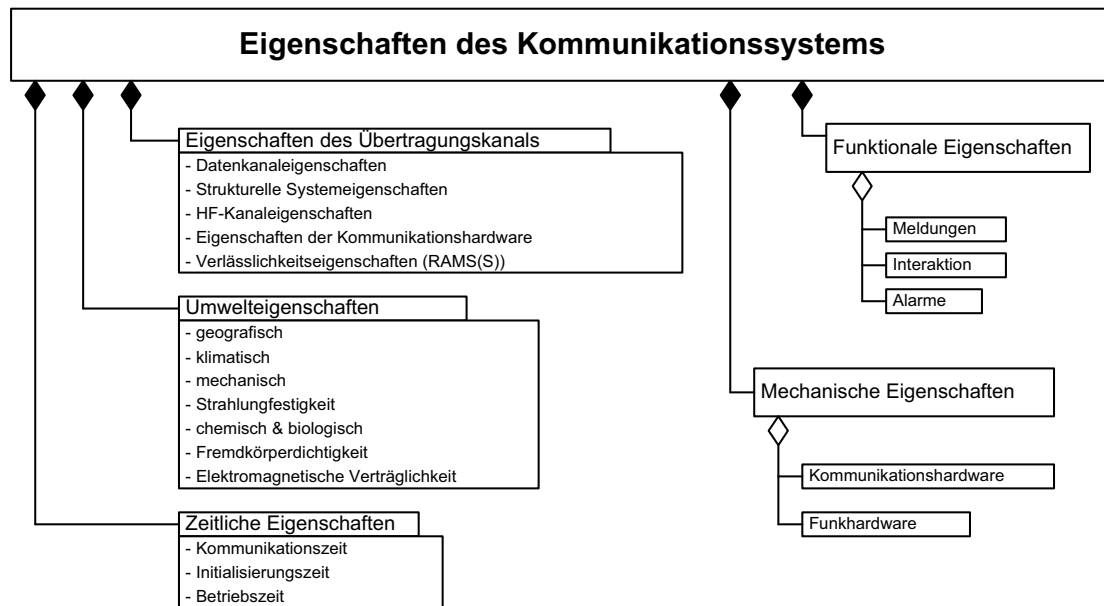


Abbildung 2.9: Klassifizierung von Kommunikationssystemen

2.3 Bewertungsmethode des Paarweisen Vergleiches

Die Methode des *Paarweisen Vergleichs* ist prädestiniert für eine objektivierete Entscheidungsfindung in Entwicklungs- bzw. Entscheidungsteams, wenn die zu realisierenden Kundenwünsche, d.h. also die Anforderungen des Lastenhefts, im Fokus stehen. Im Rahmen der Komponentenbewertung bei der Entwicklung eines Produktmodells (vgl. Abschnitt 2.2) werden die definierten Anforderungskriterien in einem Formular für den *Paarweisen Vergleich* gegeneinander gewichtet. Das Ergebnis dieser Gewichtung dient in einem zweiten Schritt der objektiven Bewertung möglicher Realisierungsansätze und so der Entwicklung einer objektiven Rangreihe der Realisierungsansätze [HEINEN 1983, KIRSTEIN 1994].

Die Priorisierung der Kriterien erfolgt mittels der sog. Prioritätenmatrix (vgl. Abbildung 2.10), die priorisierte Bewertung der Produkte bezüglich ihrer Eigenschaften erfolgt mittels der Bewertungsmatrix (vgl. Abbildung 2.11).

Das Vorgehen beim Paarweisen Vergleich gliedert sich in folgende Schritte:

1. Schritt: **Bestimmung der zu vergleichenden Kriterien**

Kriterien sind hier die Elemente und Eigenschaften des Lastenhefts. Im folgenden Beispiel sind $n=4$ Elemente angenommen.

2. Schritt: **Aufbau der Prioritätenmatrix**

Die Prioritätenmatrix ist in zwei Teiltabellen „Vergleich“ und „Priorität“ gegliedert (vgl. Abbildung 2.10). Die Kriterien werden in der Teiltabelle „Vergleich“

angeordnet und die Teiltabelle diagonal geteilt, wobei die Zellen in der Diagonale (die Zellen (11), (22), (33) usw.) keine weiteren Bedeutungen haben.

Die Kriterien werden gegeneinander gewichtet, indem im rechten oberen Teil der Teiltabelle „Vergleich“ für jede der Zellen (xy) oberhalb der Diagonalen beurteilt wird, ob das zugehörige Spalten-Kriterium x

- (a) „weniger wichtig“ (Wertigkeit 0)
- (b) „gleichwichtig“ (Wertigkeit 1)
- (c) „wichtiger“ (Wertigkeit 2)

als Zeilen-Kriterium y ist. Je nach Beurteilung wird die Wertigkeit in das Feld der Prioritätenmatrix eingetragen. Dieses Verfahren ist auch bei mehreren Entscheidern anwendbar, wobei jeder Entscheider für sich den Paarweisen Vergleich durchführt und in die Zellen der Vergleichstabelle des Teams die Summe der Bewertungspunkte aller Entscheider eingetragen wird. Durch die anschließende Normierung ergibt sich so eine objektive Priorisierung. Unterhalb der Diagonalen ist das Komplement der Wertigkeit einzutragen, d.h. $| (12) | = \max. \text{ Punktzahl} - | (21) |$. Die Priorisierung der Kriterien ergibt sich durch zeilenweise Summenbildung und anschließende Normierung (Faktoren A, B, C und D).

Vergleich					Priorität	
Kriterien	Kriterium 1	Kriterium 2	Kriterium 3	Kriterium 4	Zeilensumme	Normierung [%]
Kriterium 1		(21)	(31)	(41)		A
Kriterium 2	(12)		(32)	(42)		B
Kriterium 3	(13)	(23)		(43)		C
Kriterium 4	(14)	(24)	(34)			D

Abbildung 2.10: Aufbau der Prioritätenmatrix des Paarweisen Vergleichs

3. Schritt: **Priorisierte Bewertung der Produkte**

Anhand der prozentualen Gewichtungsfaktoren kann nun die Bewertung der Eigenschaften erfolgen. Jeder Entscheider bewertet jedes Kriterium der zu bewertenden Produkte mit einer vorher zu definierenden Punkteskala. Die Bewertungssummen sind in Abbildung 2.11 z.B. in den Faktoren w1, x1, y1 und z1 für das 1. Produkt manifestiert. Die gewichtete Bewertung erfolgt schließlich durch Multiplikation mit dem für das Kriterium bestimmten, normierten Gewichtungsfaktor (A, B, C,...).

Kriterien	Priorität [%]	Bewertung d. 1. Produkts oder Lösungsansatzes	Bewertung d. 2. Produkts oder Lösungsansatzes	Gewichtete Bewertung u. Entscheidungs-Rangreihe für 1	Gewichtete Bewertung u. Entscheidungs-Rangreihe für 2
Kriterium 1	A	w1	w2	$A \cdot w1$	$A \cdot w2$
Kriterium 2	B	x1	x2	$B \cdot x1$	$B \cdot x2$
Kriterium 3	C	y1	y2	$C \cdot y1$	$C \cdot y2$
...					
Kriterium 4	D	z1	z2	$D \cdot z1$	$D \cdot z2$
	$\Sigma=100\%$			Σ	Σ

Abbildung 2.11: Priorisierte Bewertung von Produkten oder Lösungsansätzen

Im Rahmen dieser Arbeit wird mit Hilfe dieser Methode eine objektive Bewertung möglicher Realisierungsansätze der Energieerzeuger (vgl. Abschnitt 5.4), der Energiespeicher (vgl. Abschnitt 5.5) und der Hardwaremodule anhand der definierten Anforderungen (vgl. Kapitel 3) durchgeführt und eine Auswahl abgeleitet.

2.4 Petrinetz-Werkzeuge

Als geeignetes Beschreibungsmittel zur Modellierung und Simulation der Systemeigenschaften wurden in dieser Arbeit Petrinetze gewählt [PETRI 1962, ISO15909-1:2004 2004]. Die Petrinetz-Beschreibung bildet in Symbolik, Syntaktik und Pragmatik ein allgemein gültiges und umfassendes Fundament für die Beschreibung der Systemaxiomatik und Objektorientierung sowie vor allem inhaltlicher Aspekte von Automatisierungssystemen [SCHNIEDER 1999]. Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Petrinetz-Werkzeuge eingesetzt. Petrinetz-Werkzeuge sind in der Regel spezialisiert auf einen Teilbereich der Petrinetz-Theorie, wie z.B. S/T-Netze, zeitbewertete Netze, stochastische oder gefärbte Petrinetze (vgl. Anhang A). Eine Übersicht über die im folgenden vorgestellten Petrinetz-Werkzeuge und deren Anwendungsbereiche zeigt Abbildung 2.12.

	S/T-Netze	zeitbehaftete PN	stochastische PN	gefärbte PN
TimeNET	x	x	x	
II-Tool	x	x	x	
CPNTools	x			x

Abbildung 2.12: Petrinetzwerkzeuge und deren Anwendungsbereiche

TimeNET

TimeNET ist ein für den nicht-kommerziellen Einsatz kostenloses Software-Tool für die Modellierung und Evaluierung deterministischer und stochastischer Petrinetze [ZIMMERMANN 2006]. Es ist die Weiterentwicklung des Tools *DSPNexpress*, welches seit dem Jahre 1991 an dem Institut für Prozessdatenverarbeitung und Robotik der Technischen Universität Berlin entwickelt wurde. Die aktuelle Version 4 von *TimeNET* wurde im April 2007 veröffentlicht, welches nun auf JAVA basierend sowohl unter Linux als auch unter Windows lauffähig ist. Das Tool ist besonders geeignet für die Modellierung und Analyse zeitdiskreter, deterministischer und stochastischer Petrinetze. Es werden zeitlose, zeitdiskrete, exponentielle und stochastische Transitionen zur Verfügung gestellt. Höhere sowie hierarchische Petrinetze werden nicht unterstützt. Während dieser Arbeit wurde *TimeNET* in Version 3.0 eingesetzt.

II-Tool

Am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik (IVA) der Technischen Universität Braunschweig wird seit dem Jahr 2006 ein eigenes Tool namens II-Tool zur Modellierung und Analyse von deterministischen und stochastischen S/T-Petrinetzen entwickelt. Die hierarchische Modellierung wird dabei ebenso unterstützt wie die grafische Darstellung des Zustandsraumes. Die Komplexität eines Netzes kann ebenfalls

leicht ermittelt werden. Deadlocks und Traps werden durch die Berechnung des Erreichbarkeitsgraphen ggf. aufgedeckt sowie der Weg zu diesen Markierungen ausgegeben. Weiterhin beherrscht dieses Tool die Codegenerierung für C-Code aus einem Petrinetz heraus.

CPNTools

CPNTools ist der Nachfolger von Design/CPN und wird von der sog. CPN Group an der dänischen Universität Aarhus seit dem Jahre 2001 weiterentwickelt [CPN-GROUP 2007]. Das Tool ist geeignet für die Modellierung, Simulation und Analyse von farbigen Petrinetzen (CPNs) und ist für nicht-kommerzielle Zwecke kostenlos. Es existieren Versionen für Windows XP und Linux-Systeme.

Der Nachteil von *CPNTools* liegt in der unvollständigen Unterstützung bezüglich der Kantenarten, d.h. Inhibitorkanten werden nicht nativ unterstützt und müssen durch Ersatzkonstruktionen substituiert werden. Das resultierende Petrinetz besitzt daher eine größere Anzahl von Plätzen und Transitionen als notwendig, d.h. also auch einen größeren Erreichbarkeitsgraphen. Weiterhin kann dieser Umstand dazu führen, dass die Simulation in *CPNTools* ein anderes Resultat liefert, als durch das ursprüngliche Modell mit Inhibitorkanten gewünscht und erwartet wurde.

Kapitel 3

Ermittlung der Anforderungen

3.1 Methodische Anforderungsdefinition

Zu Beginn eines Projekts sind meist nur rudimentäre Ziele und Randbedingungen bekannt. Die gegebenen Anforderungen an das System sind für den Systementwurf noch nicht hinreichend. Das Requirements Engineering erfordert die Auswahl und ggf. den Entwurf einer geeigneten Entwicklungsmethode und setzt sich zusammen aus umfangreichen Recherchen und Rücksprachen mit dem Auftraggeber sowie dem Studium von Projekten mit ähnlichen Zielen (vgl. Kapitel 4). Im Hinblick auf ein zertifizierbares Qualitätsmanagement erfolgt die Systementwicklung in der Industrie üblicherweise nach dem Wasserfall- oder dem V-Modell.

Die erste Dekompositionsebene bilden die allgemeinen und daraus abgeleitet die klassifizierten Systemeigenschaften des Gesamtsystems (vgl. Abbildung 2.8). Es wird zwischen den Anforderungen an die Betriebsbedingungen bzw. den durch den Betriebsablauf und das -umfeld eingprägten Eigenschaften an das zu realisierende System, den technischen bzw. technologischen Anforderungen an das Kommunikationssystem sowie den funktionalen Anforderungen unterschieden. Diese untergliedern sich wiederum in mechanische, elektrische, zeitliche, technische bzw. technologische und Umwelanforderungen.

3.2 Hauptanforderungen und Einsatzbereich

Wie in Kapitel 1 dieser Arbeit erwähnt, ist ein funkbasiertes Kommunikationssystem mit energieautarken Kommunikationsgeräten für den Einsatz im Schienengüterverkehr zu realisieren. Ziel ist der Informationsaustausch zwischen den Fahrzeugen eines Fahrverbandes, vor allem zwischen den Wagen und dem Zugfahrzeug, d.h. meist der Lokomotive. Relevante Informationen betreffen primär den Status der einzelnen (ausgerüsteten) Wagen sowie die Integrität des Fahrverbandes. Gerade im Schienengüterverkehr sind diese Informationen von besonderem Interesse, da bisher keine zuverlässige Lösung für eine Intrazugkommunikation verfügbar ist. Weitere Randbedingungen sind z.B. eine

wartungsarme und vor allem energieautarke Ausführung der Wagengeräte, sowie die automatische kommunikationstechnische Konfiguration des Kommunikationssystems.

Die Hauptanforderungen lassen sich wie folgt untergliedern:

- Kommunikation
 - Kommunikation innerhalb eines Fahrverbands (Intrazugkommunikation)
 - Betrieb der Einrichtung unabhängig von der Reihung der Wagen im Verband
 - Dynamische Konfiguration ohne Kenntnis der lokal-geografischen Verteilung der Kommunikationsgeräte (automatische Inauguration)
 - Vermeidung von Patent- und Rechteverletzungen
- Energieversorgung
 - Autarke Energieversorgung der Kommunikationseinrichtungen jedes ausgerüsteten Wagens
 - Wartungsfreiheit während des Revisionsintervalls eines Wagens (i.d.R. 6 Jahre)
- Allgemeine Anforderungen
 - Rückwirkungsfreiheit bezüglich des Bahnbetriebes und des Betriebsablaufs
 - Betriebssicherheit

3.3 Dekomposition der Anforderungen

Entsprechend der Anforderungsklassifizierung in Abbildung 2.7 lassen sich die Anforderungen an das zu entwickelnde Kommunikationsgerät klassifizieren und dekomponieren in die Anforderungen an die Subsysteme bzw. Komponenten. Es resultiert eine orthogonale Systemstruktur aus allgemeinen (systemischen) Anforderungen, Anforderungen an die Kommunikation sowie Anforderungen an die Energieversorgung entsprechend Abbildung 3.1. Durch Dekomposition ergeben sich unmittelbar die Anforderungen an die Teilsysteme bzw. an die Komponenten. Die Dekomposition wurde bis zu den Größen der Eigenschaftsmerkmalen durchgeführt (vgl. Abbildung 2.7).

Die Werte der Größen werden in den entsprechenden Abschnitten dieser Arbeit für die Analyse, Bewertung und Auswahl der Komponenten der Teilsysteme Energieversorgung in Kapitel 5 und Kommunikation in Kapitel 6 ermittelt.

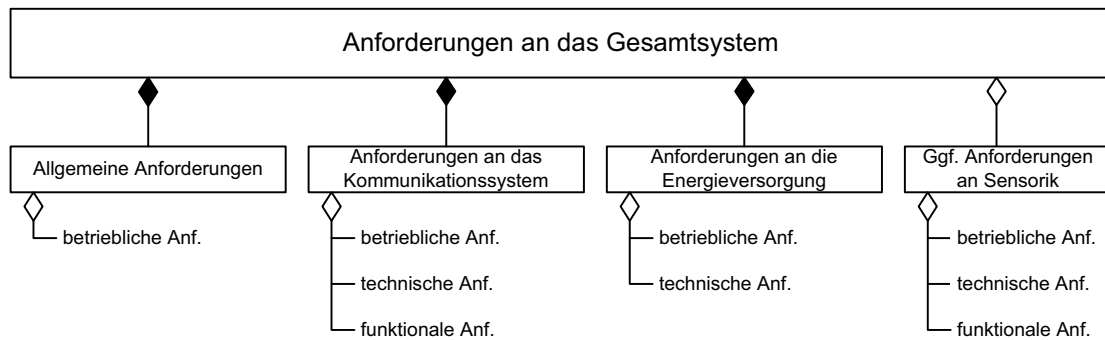


Abbildung 3.1: Komponenten des Gesamtsystems und deren Anforderungsklassen

3.3.1 Allgemeine Anforderungen

Die allgemeinen Anforderungen an das zu entwickelnde System lassen sich entsprechend Abbildung 3.2 in die betrieblichen Anforderungen dekomponieren. Die Anforderungen werden entsprechend der Kundenvorgaben und der normativen Vorgaben sowie Richtlinien und Gesetzen im Lastenheft und in einer Darstellung des Anforderungsquerschnitts in Form einer Lastenheftmatrix festgelegt (vgl. Abschnitt 3.4 und Abbildung 3.19).

3.3.2 Anforderungen an die Kommunikation

Die Anforderungen an das Subsystem Kommunikation wird bezüglich der betrieblichen, funktionalen sowie technischen Anforderungen dekomponiert (vgl. Abbildungen 3.3, 3.4 und 3.5).

3.3.3 Anforderungen an die Energieversorgung

Die Anforderungen an das Subsystem Energieversorgung werden bezüglich der technischen und betrieblichen Anforderungen dekomponiert. Es ergibt sich eine methodische Darstellung entsprechend der Abbildungen 3.6 und 3.7.

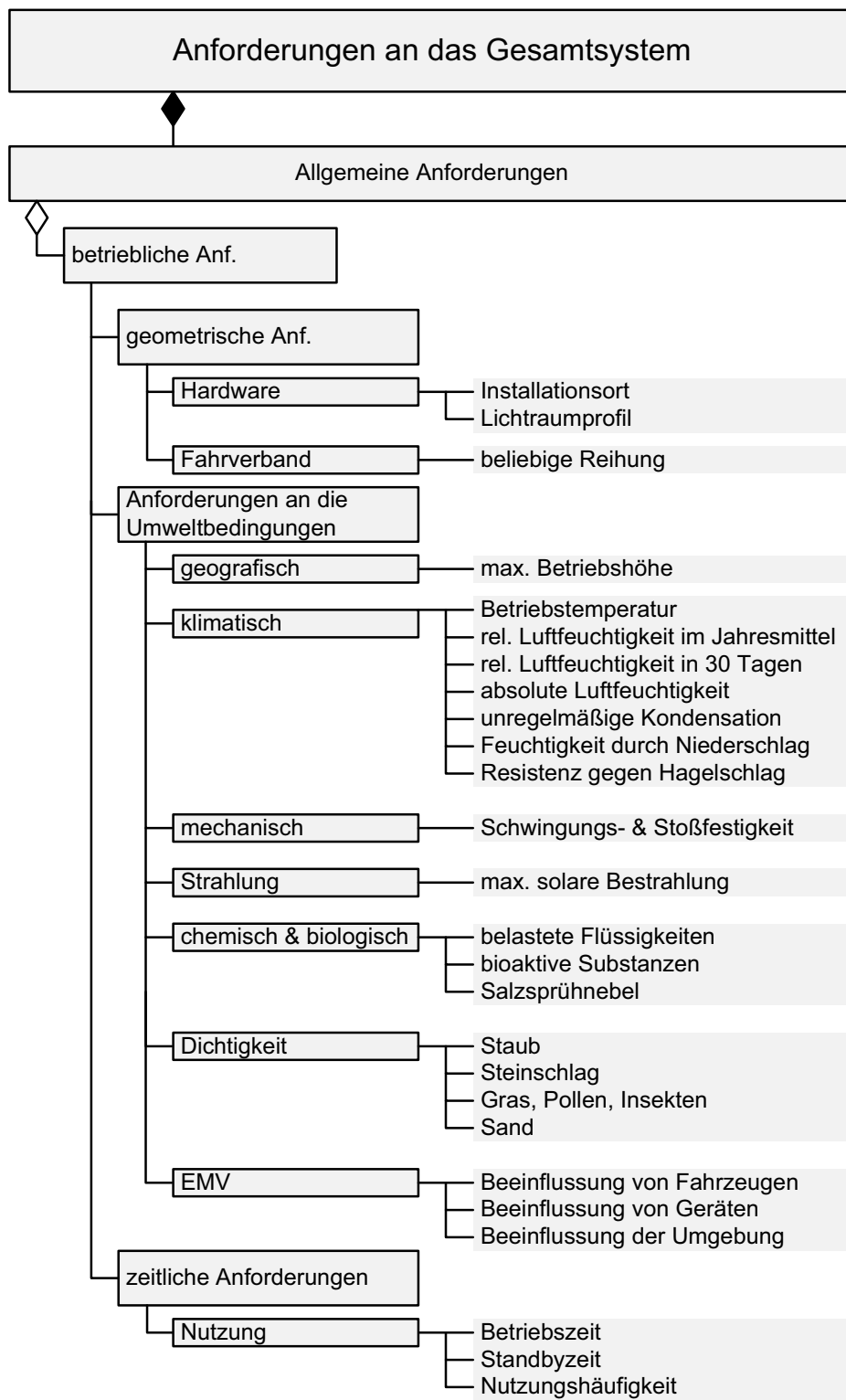


Abbildung 3.2: Dekomposition der allgemeinen Anforderungen

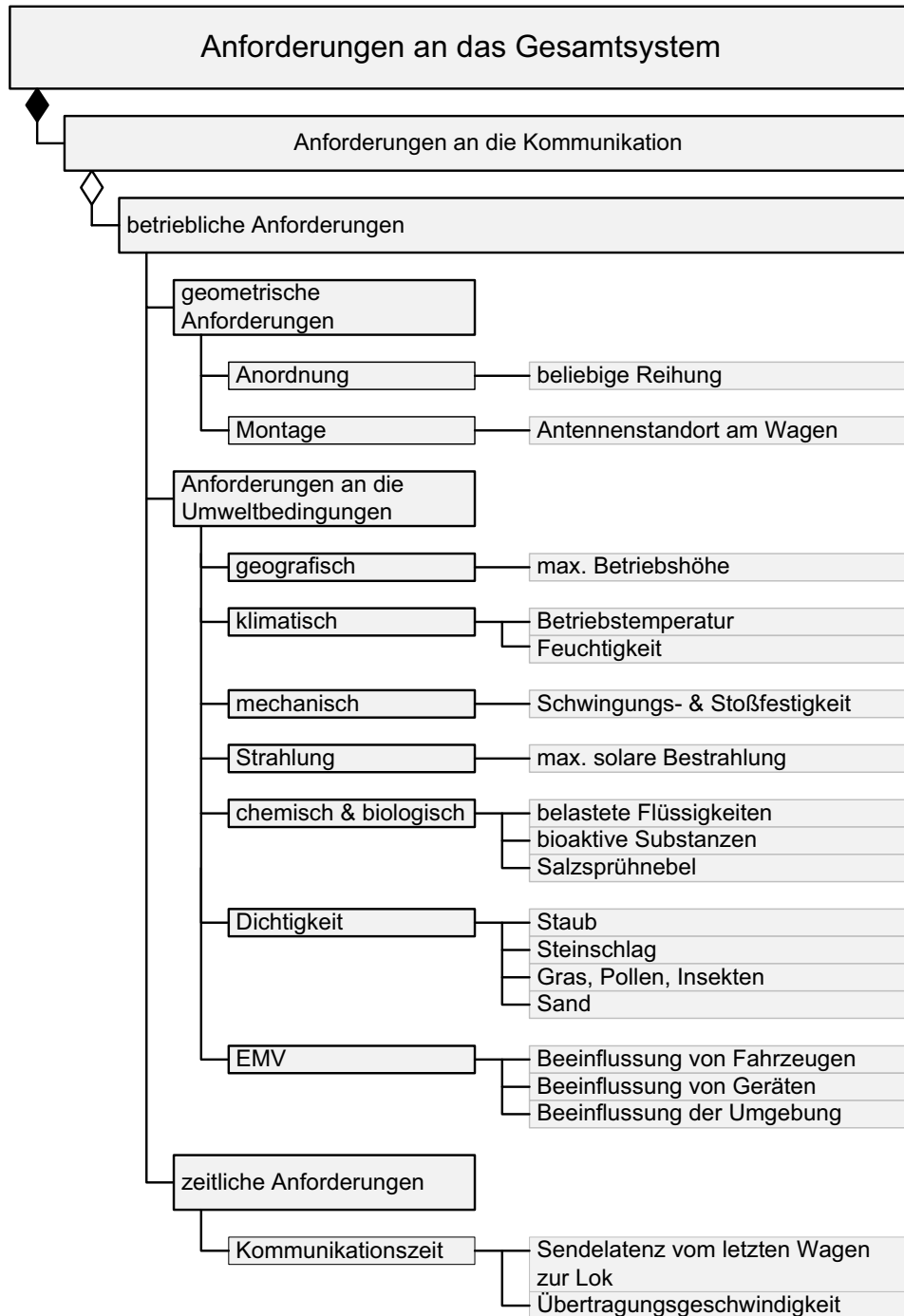


Abbildung 3.3: Dekomposition der Anforderungen an das Subsystem Kommunikation (Teil 1)

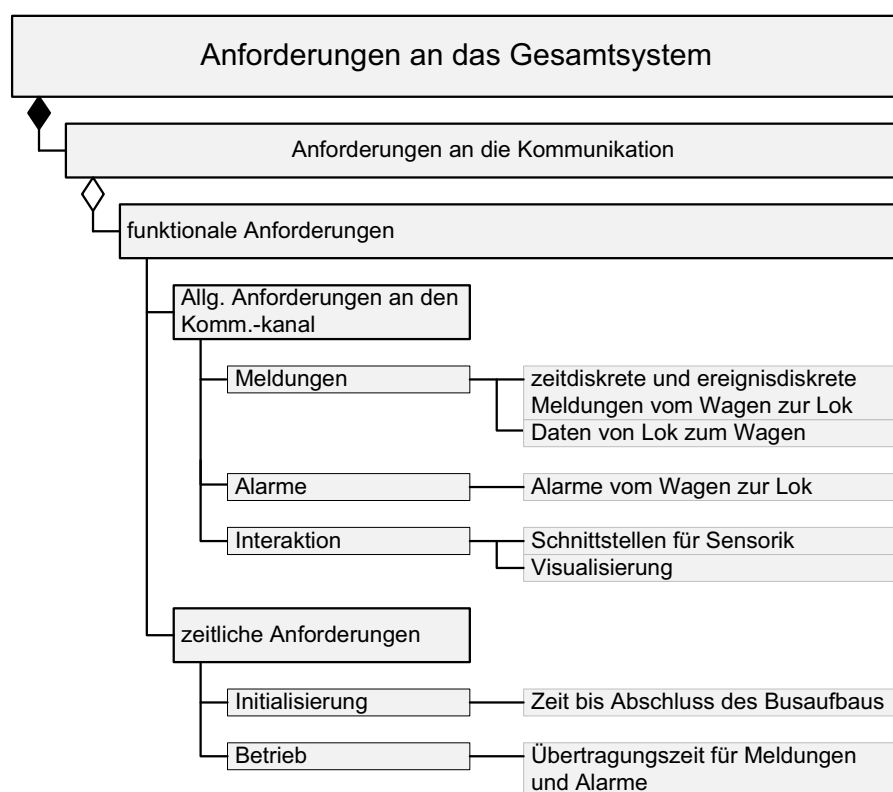


Abbildung 3.4: Dekomposition der Anforderungen an das Subsystem Kommunikation (Teil 2)

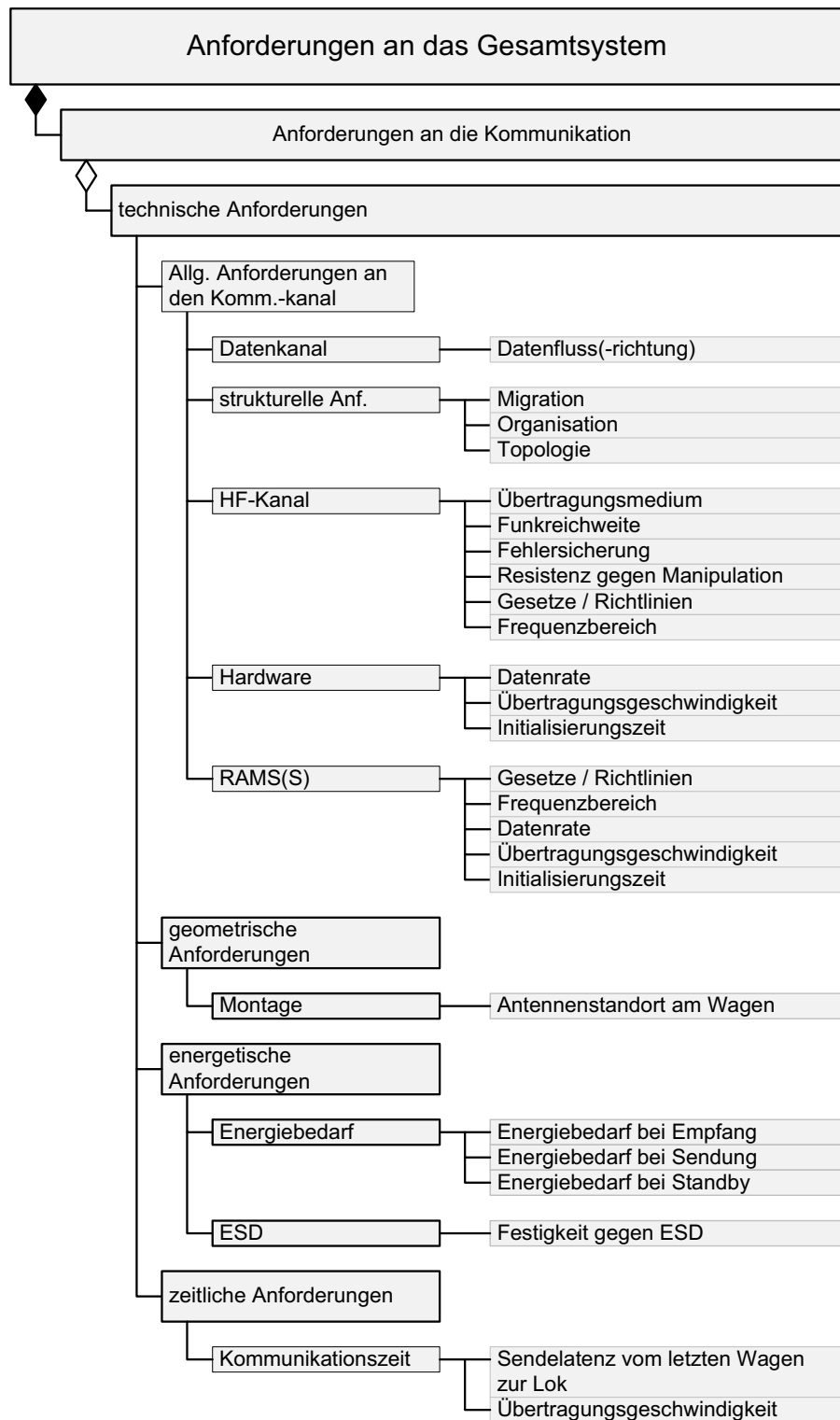


Abbildung 3.5: Dekomposition der Anforderungen an das Subsystem Kommunikation (Teil 3)

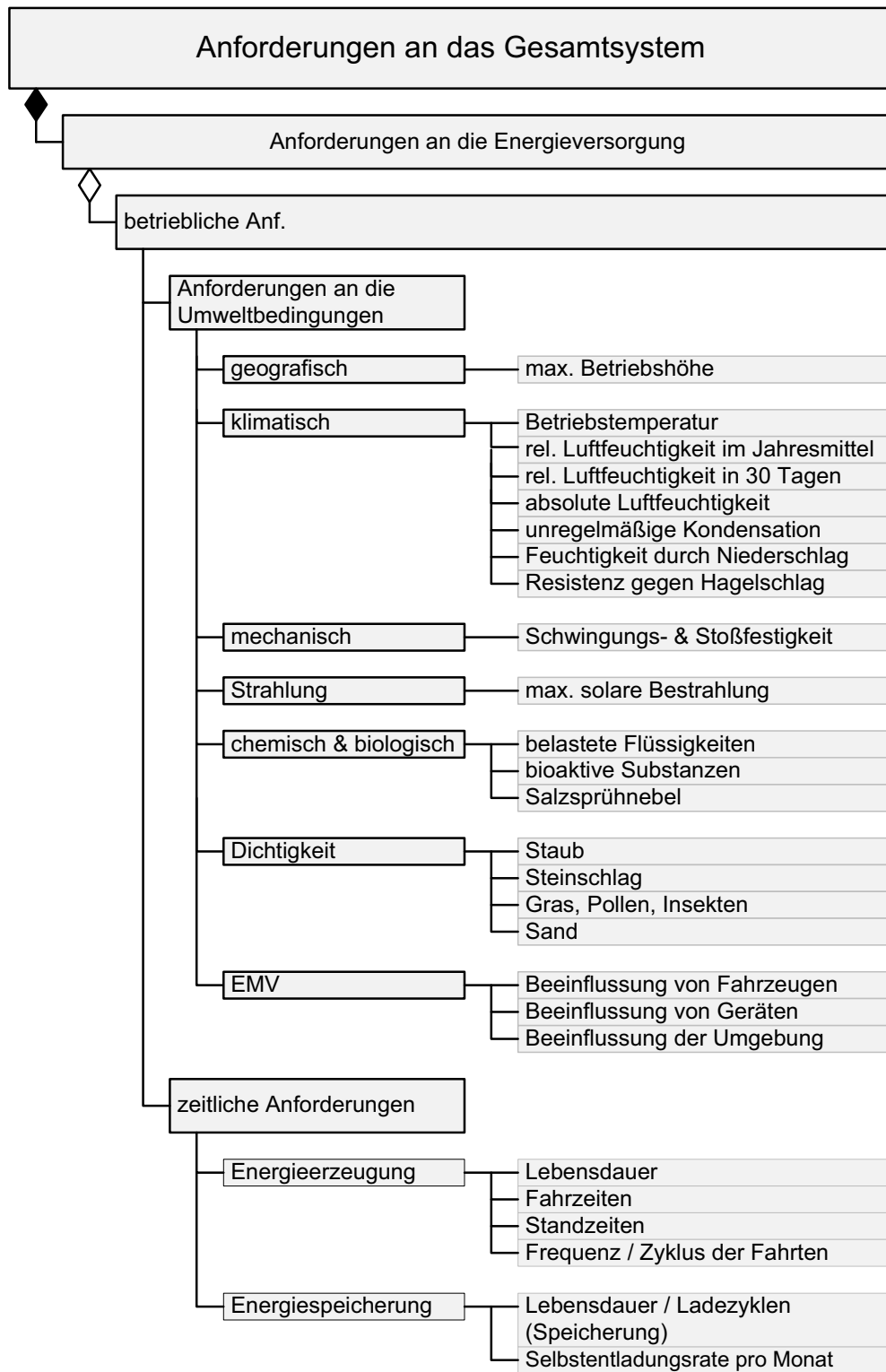


Abbildung 3.6: Dekomposition der Anforderungen an die Energieversorgung (Teil 1)

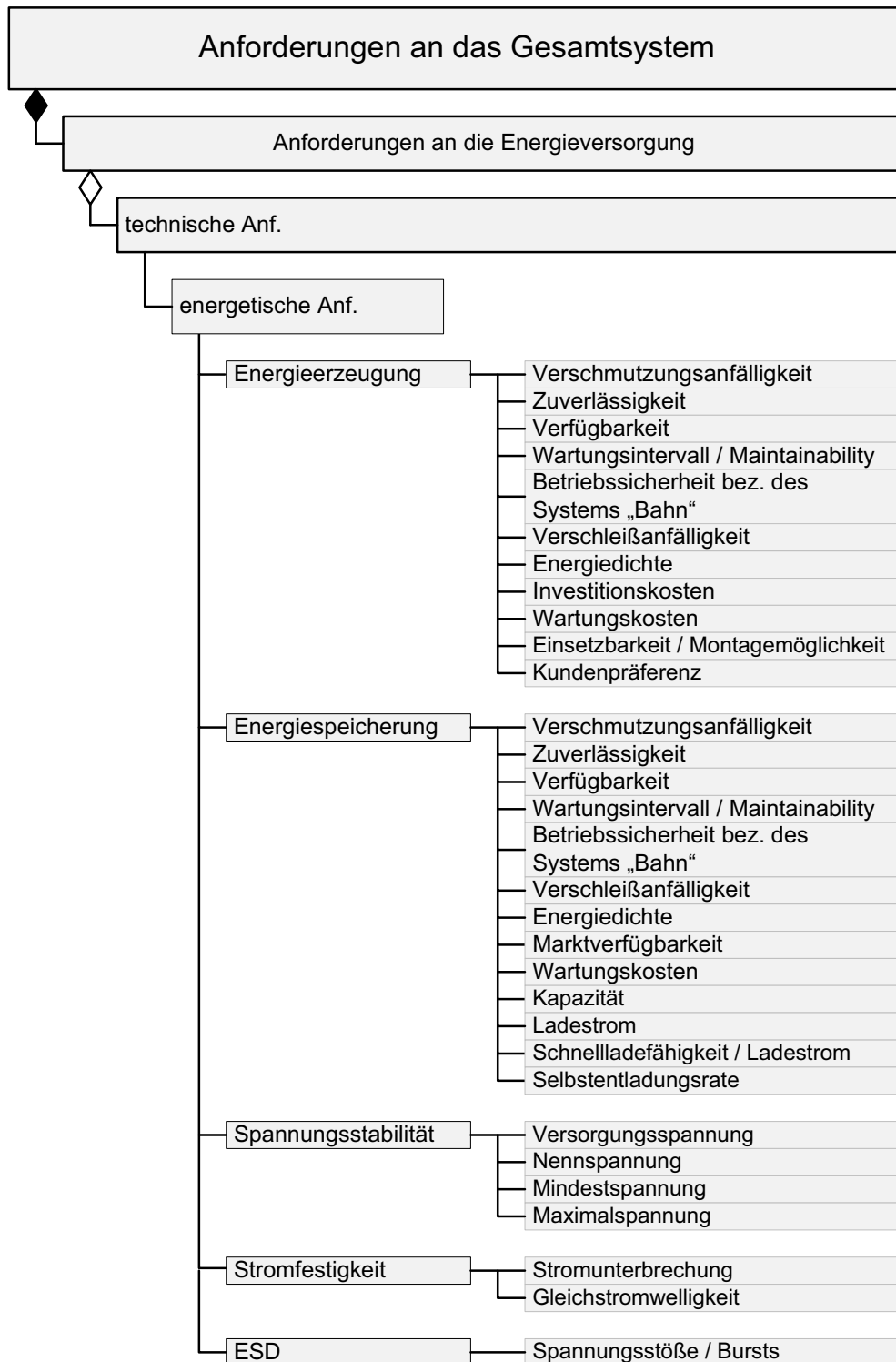


Abbildung 3.7: Dekomposition der Anforderungen an die Energieversorgung (Teil 2)

3.4 Querschnitt der Anforderungen

Anders als die Dekomposition der Anforderungen pro Teilsystem oder Komponente in Abschnitt 3.3 stellt der Anforderungsquerschnitt die Gesamtheit der Anforderungsklasse, z.B. der geometrischen Anforderungen, als Querschnitt über das Gesamtsystems dar. Dies ist z.B. für die gegenüberstellende Beurteilung des Stands der Technik in Abschnitt 4.4 gegen die Anforderungen des zu entwickelnden Kommunikationssystems hilfreich, da die Eigenschaften vorhandener Systeme oft nicht im Detail für jedes Subsystem ermittelbar sind.

3.4.1 Anforderungen aus dem betrieblichen Einsatz

Die betrieblichen Anforderungen werden durch den betrieblichen Einsatz geprägt und gliedern sich in die geometrischen, elektrischen und zeitlichen Anforderungen sowie in die Anforderungen an die Umweltbedingungen.

Geometrische Anforderungen

In Abbildung 3.8 sind die Anforderungen bezüglich der Geometrie und Position der Fahrzeuggeräte aus dem betrieblichen Einsatz klassifiziert und dekomponiert. Die Skalierung, die Werte sowie die Dimension der Größen werden in Kapitel 6 ermittelt.

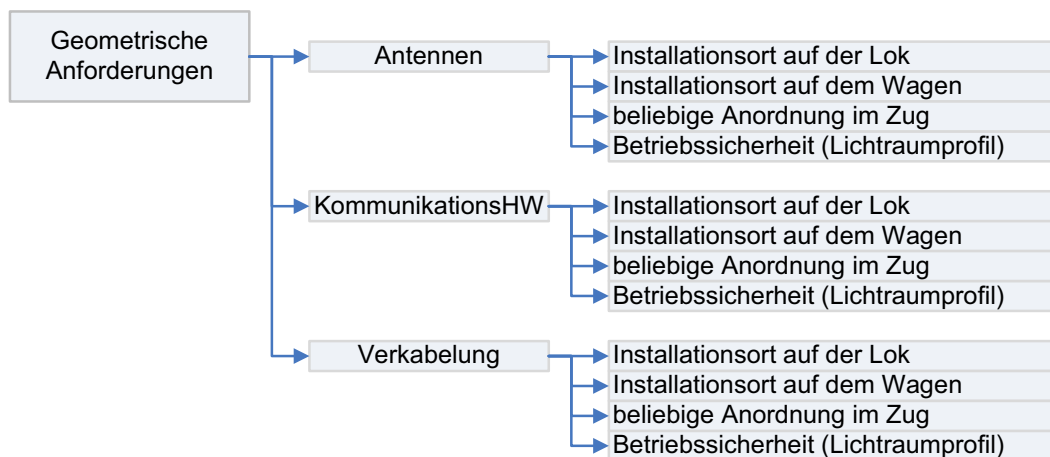


Abbildung 3.8: Dekomposition der geometrischen Systemanforderungen aus dem betrieblichen Einsatz

Anforderungen an die Umweltbedingungen

Die Dekomposition der Anforderungen an die Umweltbedingungen ergibt sich aus den Normen EN50155, EN61373, EN60721, EN60721-3-5, EN50121-3-1 sowie EN50121-3-2 und sind in Abbildung 3.9 dargestellt [EN50155 2001, EN61373 1999, EN60721-3 2003, EN60721-3-5 2001, EN50121-3-1 2001, EN50121-3-2 2001].

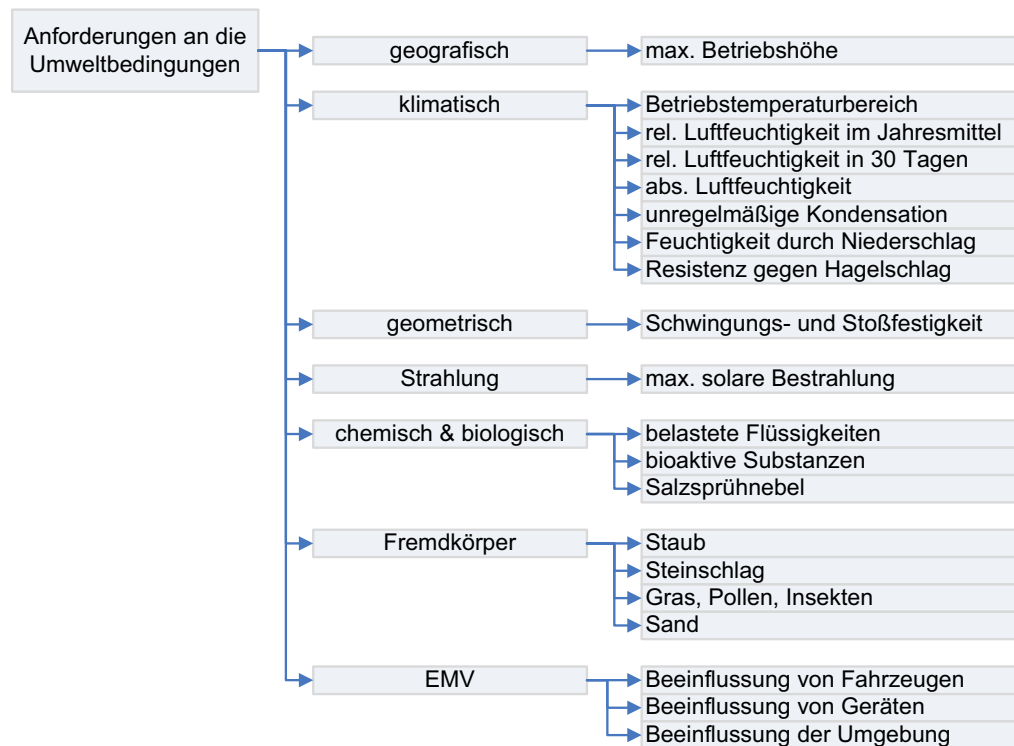


Abbildung 3.9: Dekomposition der Systemanforderungen an die Umweltbedingungen

Energetische Anforderungen

Die Dekomposition der energetischen Anforderungen ergibt sich ebenfalls aus EN50155 [EN50155 2001] und ist in Abbildung 3.10 dargestellt.



Abbildung 3.10: Dekomposition der energetischen Systemanforderungen

Zeitliche Anforderungen

Die Anforderungen an das Zeitverhalten bezüglich des betrieblichen Einsatzes betreffen die Nutzung der Geräte. Es ergibt sich die Dekomposition entsprechend Abbildung 3.11. Die Skalierung, die Werte sowie die Dimension der Größen ergeben sich aus dem Einsatzprofil (vgl. Abschnitt 5.3).

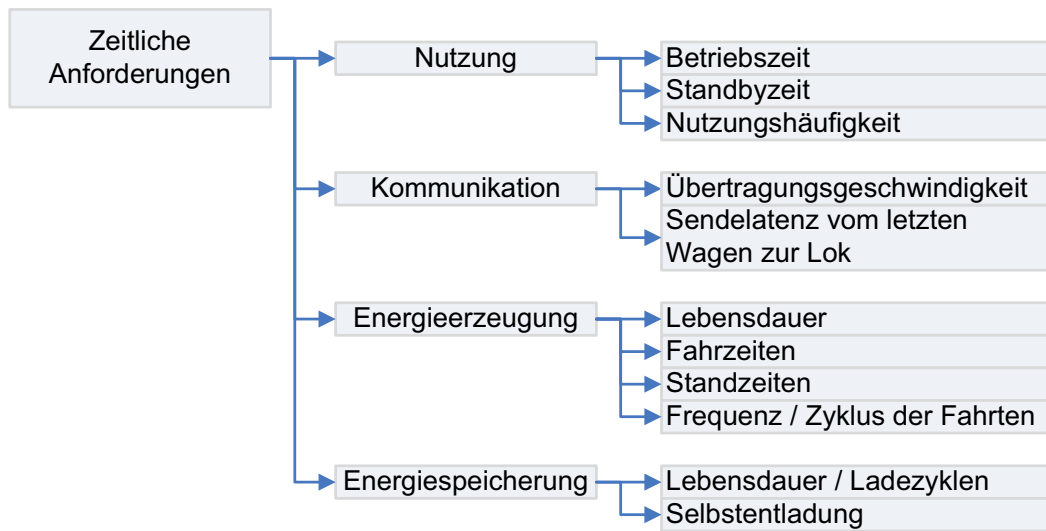


Abbildung 3.11: Dekomposition der Systemanforderungen an das Zeitverhalten

3.4.2 Technische Anforderungen

Die technischen Anforderungen an das zu realisierende Kommunikationssystem setzen sich aus den allgemeinen Anforderungen an den Funkkanal sowie den geometrischen, elektrischen und zeitlichen Anforderungen zusammen.

Anforderungen an den Kommunikationskanal

Die Dekomposition der Anforderungen an den Kommunikationskanal gliedert sich in die technischen Anforderungen, die strukturellen Anforderungen, den HF-Kanal, die Kommunikationshardware und die Sicherheitsanforderungen *RAMS(S)* (vgl. Abbildung 3.12). Sie ergeben sich aus der Norm EN62280-2 [EN62280-2 2003].

Geometrische Anforderungen

Die Dekomposition der geometrischen Anforderungen ergibt sich aus EN50129 [EN50159-1 2003, EN50159-2 2002] und werden nach Abbildung 3.13 festgelegt.

Energetische Anforderungen

Die Dekomposition der energetischen Anforderungen ist in Abbildung 3.14 dargestellt.

Zeitliche Anforderungen

Die Dekomposition der zeitlichen Anforderungen bezüglich der Eigenschaften, Merkmale und Größen des Kommunikationssystem ergibt die in Abbildung 3.15 dargestellte Struktur.

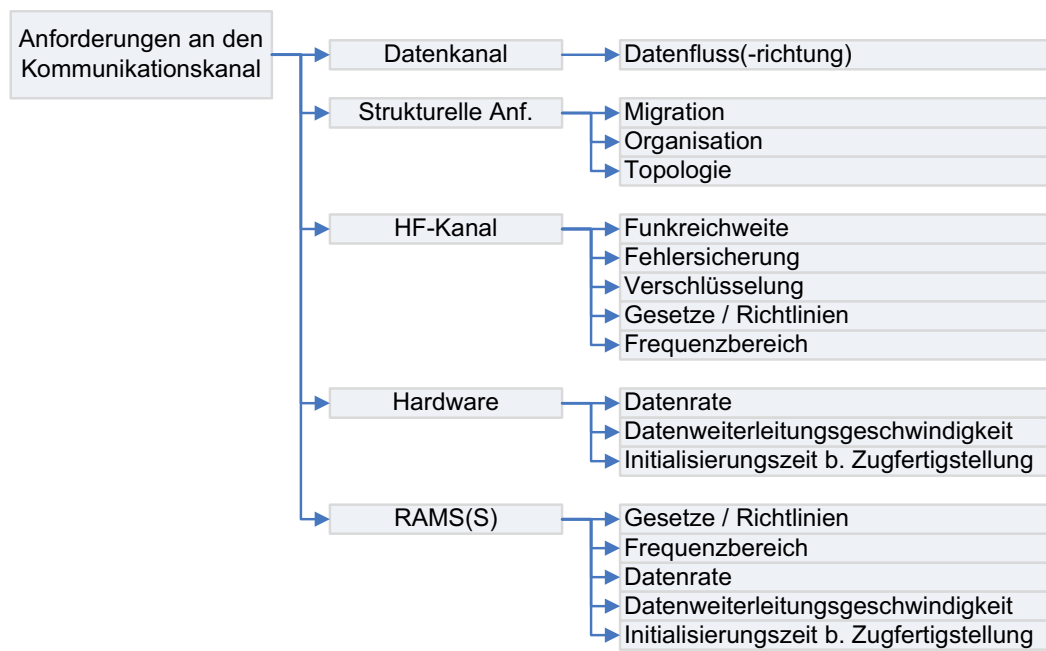


Abbildung 3.12: Dekomposition der Systemanforderungen an den Funkkanal



Abbildung 3.13: Dekomposition der geometrischen Systemanforderungen

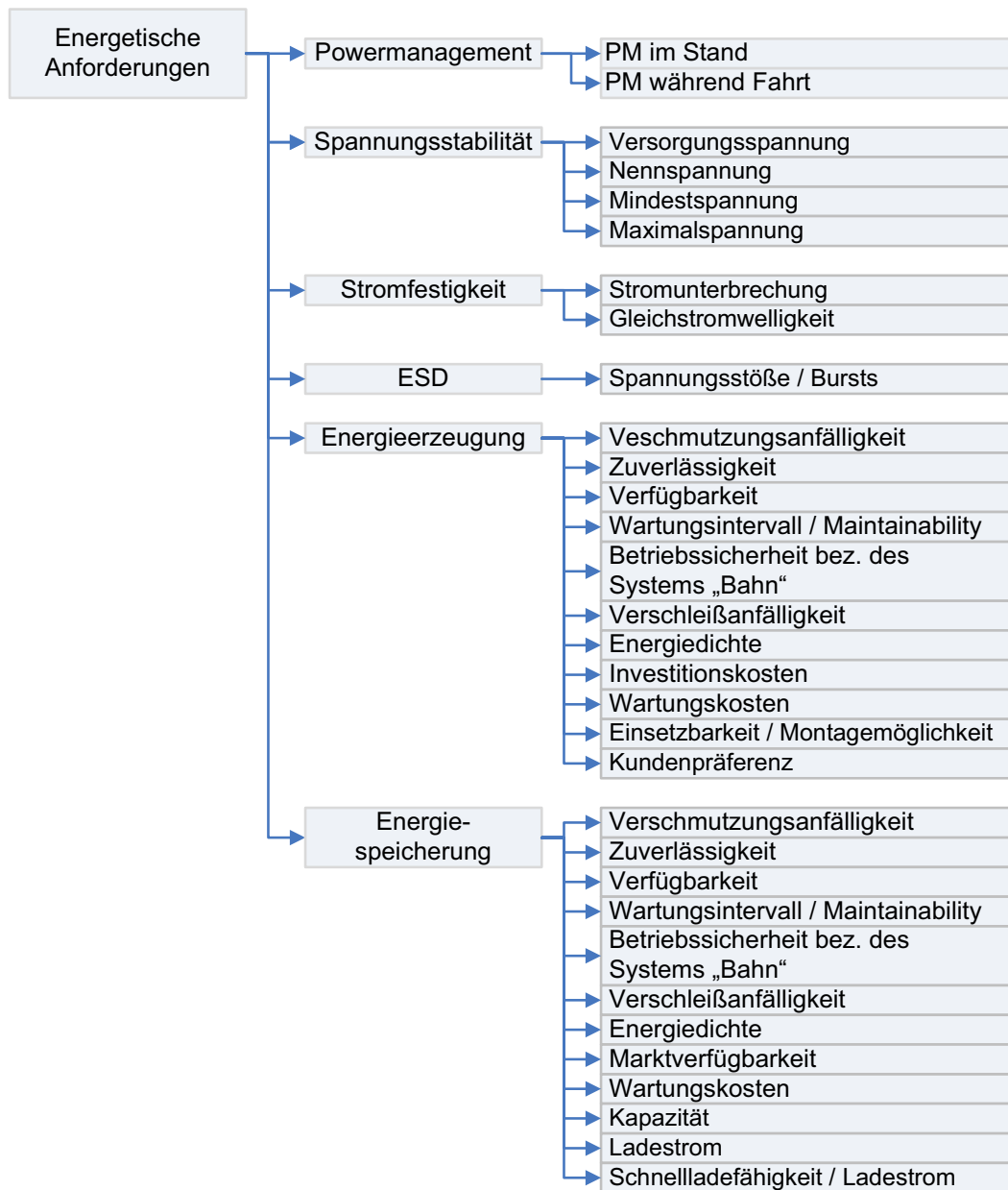


Abbildung 3.14: Dekomposition der energetische Systemanforderungen

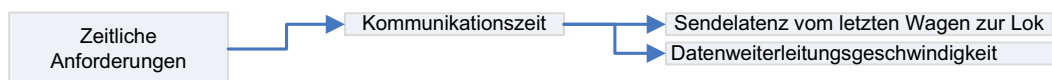


Abbildung 3.15: Systemanforderungen an das Zeitverhalten der Kommunikation

3.4.3 Funktionale Anforderungen

Die funktionalen Anforderungen an das Kommunikationssystem ergeben sich aus den funktionalen Basisanforderungen und den zeitlichen Anforderungen.

Funktionale Basisanforderungen

Die Eigenschaften, Merkmale und Größen der funktionalen Basis- oder Grundanforderungen werden nach Abbildung 3.16 dekomponiert.

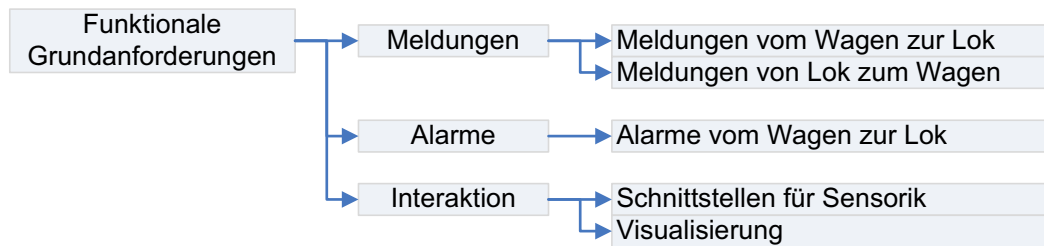


Abbildung 3.16: Dekomposition der funktionalen Basisanforderungen

Zeitliche Anforderungen

Die funktionalen Anforderungen an das Zeitverhalten beschränken sich auf die Inaugurationszeit, d.h. die Zeit, nach der die Initialisierung des Kommunikationssystems abgeschlossen ist, sowie die Betriebszeiten (Abbildung 3.17).

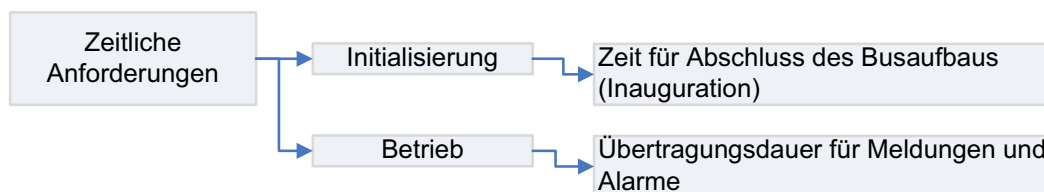


Abbildung 3.17: Dekomposition der funktionalen Anforderungen an das Zeitverhalten

3.4.4 Zusammenfassende Darstellung

Aus der vorhergehenden Analyse und Festlegung der Anforderung im Querschnitt sowie in orthogonaler Darstellung bezüglich des Gesamtsystems und dessen Teilsystemen lässt sich eine paradigmatische, systemorientierte Darstellung der Struktur, Dekomposition, Kausalität und Temporalität des Systems in einer Top-Down-Darstellung entsprechend Abbildung 3.18 erarbeiten.

In einer Anforderungsmatrix lassen sich die dekomponierten Systemanforderungen bezüglich Eigenschaft, Merkmal und Größe durch eine zu einer anschaulichen Übersicht

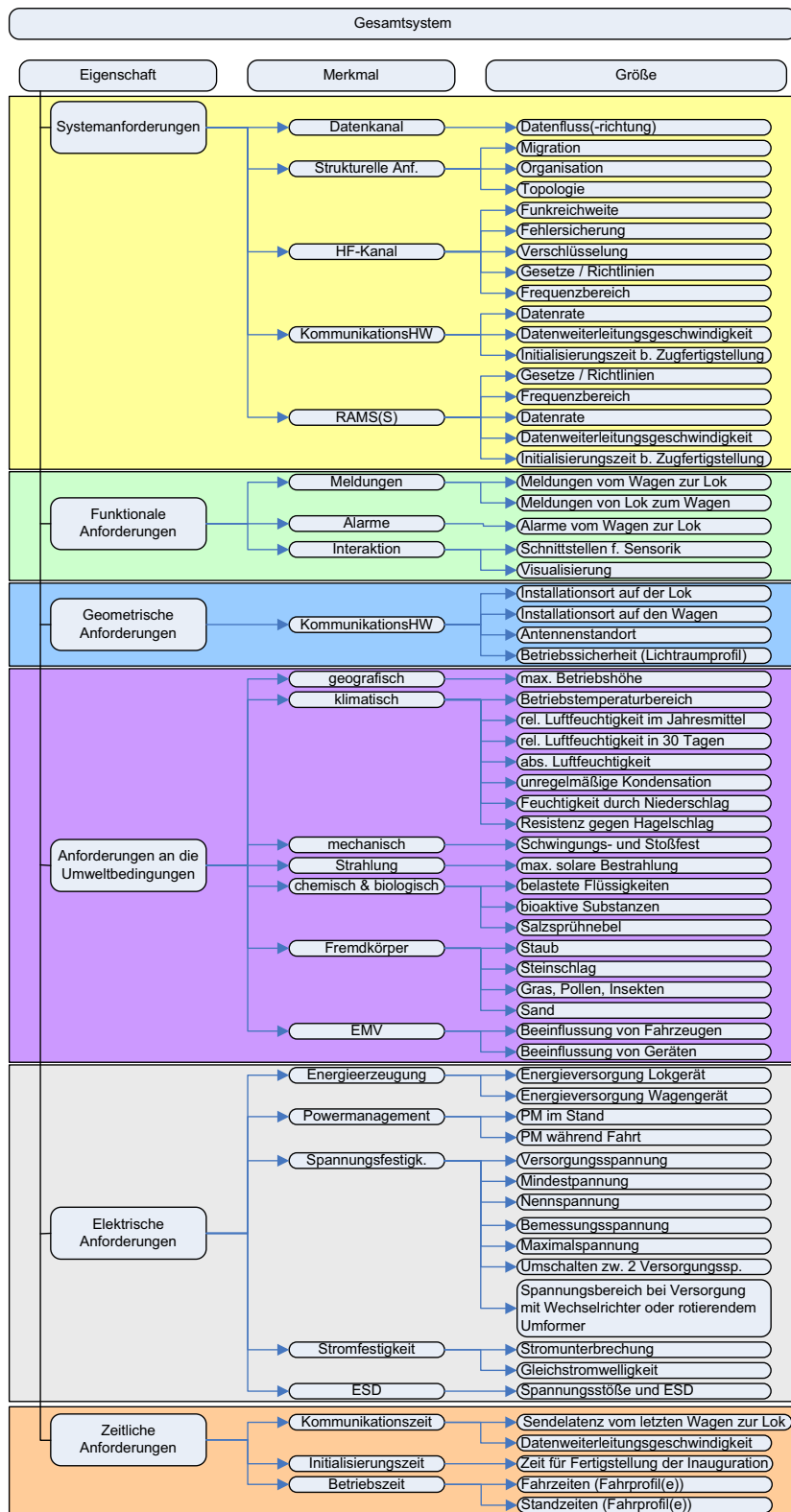


Abbildung 3.18: Top-Down-Darstellung der Systemdarstellung

des Anforderungsquerschnitts zusammenfassen (vgl. Abbildung 3.19). Diese ergibt sich unmittelbar aus der Top-Down-Darstellung der Systemdarstellung (Abbildung 3.18). Wie bereits in Abschnitt 3.3.1 erwähnt, werden die Werte durch Kunden- und normative Vorgaben sowie Richtlinien und Gesetze ermittelt (vgl. Abschnitt 3.3.1). Nicht alle Anforderungen lassen sich zu Beginn des Entwicklungsprozesses bereits eindeutig festlegen. Aufgrund der methodischen Entwicklung des Produktmodells und der während der Entwicklungsphase des Requirements Engineering klassifizierten Anforderungen können offene Anforderungen auch zu einem späteren Zeitpunkt, spätestens jedoch zu Beginn der Entwicklungen der Subsysteme, also der Energieversorgung und Kommunikation, aufgegriffen, geklärt und festgelegt werden.

Die Beurteilung möglicher Lösungen und Komponenten anhand der dekomponierten Größen der klassifizierten Anforderungen des Gesamtsystems bzw. der entsprechenden Subsysteme Energieversorgung (vgl. Kapitel 5) oder Kommunikation (vgl. Kapitel 6) erfolgt mit der Bewertungsmethode des *Paarweisen Vergleichs* (vgl. Abschnitt 2.3).

Eigenschaft	Merkmal	Größe	Soll-Wert	Norm/ Richtlinie
Systemanforderungen	Datenkanal	Datenfluss	unidirektional, bei Bedarf aufgrund Sicherungsverfahren bidirektional (entsprechend Kommunikationsbetriebskonzept)	
	Strukturelle Systemanforderungen	Migration	Mischbetrieb von ausgerüsteten und nicht ausgerüsteten Wagen soll möglich sein	
		Organisation	Master-Slave	
		Topologie	entsprechend Kommunikationsbetriebskonzept	
	HF-Kanal	Funkreichweite	mindestens 700 Meter	
		Fehlersicherung	entsprechend Kommunikationsbetriebskonzept	
		Verschlüsselung	entsprechend Kommunikationsbetriebskonzept	
		Gesetze	Beachtung der in der EU geltenden Richtlinien und Gesetze	
		Frequenz	Verwendung einer Frequenz im ISM Band (2,4 GHz) => Interoperabilität	
	Kommunikationshardware	Datenrate	ca. 5 Bits bis 15 Bits/s oder größer, abhängig vom verwendeten Sicherungsverfahren, Spezifikation im Kommunikationsbetriebskonzept	EN 62280-2
		Datenweiterleitungsgeschwindigkeit	mindestens 250 m/s, abh. vom Nachrichtentyp (sicherheitsrelevante Daten müssen innerhalb einer Sekunde den Zug durchquert haben)	
		Initialisierungszeit z. B. bei Zugfertigstellung	weniger als 10 Minuten	
	RAMS(S)	Reliability		
		Availability		
		Maintainability	wartungsfrei innerhalb Revisionszeitraum der Güterwagen (4 bzw. 6 Jahre) bzw. innerhalb der Zeit bis zu planmäßigem Werkstattaufenthalt	
		Safety	keine Beeinträchtigung der Betriebssicherheit des Bahnbetriebs, rückwirkungsfrei	
		Security		
Funktionale Anforderungen	Meldungen	Übertragung von Meldungen vom Wagen zur Lok	Temperaturen (16 Bit Digitalwert)	
			Drücke (16 Bit Digitalwert)	
			Beschleunigungen (16 Bit Digitalwert)	
			Bremsenverschleiß (binär digital)	
			Datenvolumen: etwa 2 Bits (128 Bit Sicherung), bzw. 7 Bits (384 Bit Sicherung) pro Sensor	
		Übertragung von Meldungen von der Lok zum Wagen	Bremsbefehle (Annahme: 16 Bit Digitalwert, muss innerhalb einer Sekunde den Wagen erreicht haben (Offenbarungszeit 1s))	
			Datenvolumen: etwa 5 Bits	
	Interaktion	Schnittstellen für Sensorik / Aktorik	Standardschnittstellen	
		Visualisierung	Visualisierung bedienerrelevanter Daten	
	Alarmer	ggf. Übertragung von Alarmen vom Wagen zur Lok	Entgleisung (binär digital, muss innerhalb einer Sekunde die Lok erreicht haben (Offenbarungszeit 1s))	
Geometrische Anforderungen	Kommunikationshardware	Installation auf der Lok	permanent	EBO
		Installation auf den Wagen	permanent ggf. an unterschiedlichen Positionen (abh. Vom Wagentyp)	EBO
		Sicherheit	Keine Gefährdung für den Bahnbetrieb	EN 50129
	Funkhardware	Antennenstandort	Seitlich in der Mitte der Wagenlängsseite oder unter dem Wagen im Schnittpunkt der Längsdiagonalen, Lichtraumprofil darf nicht verletzt werden	
	Umweltbedingungen	Geografisch	max. Betriebshöhe (angelehnt an AEIF)	höchstens 2000m
		Klimatisch	minimale Betriebstemperatur entspr. EN 50155, T1	-25 °C
			maximale Betriebstemperatur entspr. EN 50155, T1	+40 °C
			relative Luftfeuchte im jährl. Mittel im Betrieb	höchstens 75 %
			rel. Luftfeuchte an 20 aufeinander folgenden Tagen	nicht kleiner als 75 %
			rel. Luftfeuchte an 30 aufeinander folgenden Tagen	nicht größer als 95 %
			gelegentliche Luftfeuchte hat keinen Einfluss	zwischen 95 % und 100 %
			absolute Luftfeuchtigkeit	maximal 30 g/m³
			unregelmäßige Kondensation	soll nicht zu Fehlern führen
		Regen	Regen soll keinen Einfluß haben	bis 6 mm/Minuten
			Hagelkörner sollen keine Beschädigungen	bis 15 mm Größe
	Mechanisch	Schwingungs- und Stoßfest gemäß	EN 61373	EN 61373
	Strahlung	Solare Bestrahlung soll kleiner sein als	1120 W/m² für max. 8 Stunden	
	Chemisch & Biologisch	Belastete Flüssigkeiten	Klasse SF2 (elektrischer Antrieb) der EN 60721-3-5:1997	EN 60721
			Klasse SF3 (thermischer Antrieb) der EN 60721-3-5:1997	EN 60721
		Bioaktive Substanzen	Klasse SB2 der EN 60721-3-5:1997	EN 60721
		Salzsprühnebel	Entsprechend EN 60721-3-5:1997, Klasse SC2	EN 60721-3-5
	Fremdkörper	Staub	definiert in Klasse SS2 der EN 60721-3-5:1997	EN 60721
			Gegenstände mit einem Durchmesser von maximal 15 mm	EN 60721
			Für die Auslegung von Belüftungen	EN 60721
			Gemäß EN 60721-3-5:1997	EN 60721
	EMV	Zug und gesamtes Fahrzeug	keine Beeinflussung	EN 50121-3-1
			keine Beeinflussung	EN 50121-3-2
Elektrische Anforderungen	Energieerzeugung	Energieversorgung der Lokeinheit erfolgt	von der Bordversorgung der Lok selbst	
			durch lokale Energieerzeugung direkt auf dem Wagen (Autonomie)	
	Energieversorgung der Wagen erfolgt	Während der Fahrt	soll die Betriebsenergie, sowie die Energie zur Ladung der Akkumulatoren erfolgen	
			Bei Ausfall von Energiewandlern soll Betrieb weitere 24 Stunden gewährleistet sein	
	Standby-Zeiten		richten sich nach Einsatzszenario (eine Woche bis 5 Monate)	
	Spannung	Versorgungsspannung	standardisiert, entspr. EN50155, 12 Volt bei Verwendung von herkömmlicher Solartechnik sinnvoll	EN 50155
		Mindestspannung	0,7 Un	EN 50155
		Nennspannung	Un	EN 50155
		Bemessungsspannung	1,15 Un	EN 50155
		Maximalspannung	1,25 Un	EN 50155
		Umschalten zwischen zwei Versorgungsspannungen	Klasse C1 der EN50155, Einrichtung muss stabil arbeiten, wenn die Energieversorgung umgeschaltet wird. Spannung darf für 100 ms auf 0,6 Un absinken.	EN 50155
	Strom	Unterbrechung der Stromversorgung	Bei Versorgung mit Wechselrichter oder rotierendem Umformer	0,9 Un <= Un <= 1,1 Un
				EN 50155
	Gleichstromwellenfaktork		Unterbrechung der Stromversorgung	Klasse S1 der EN50155, keine Unterbrechung der Spannungsversorgung im Betrieb
				maximal 15%
	ESD	Spannungsschläge und ESD	Das System muss unempfindlich sein gegen vor direkt eingekoppelten oder induzierten Spannungen	EN 50155
Zeitliche Anforderungen	Kommunikationszeit	Sendelatenz vom letzten Wagen zur Lok	Datengeschwindigkeit 250 m/s, bei sicherheitsrelevanten Meldungen gilt Fehleroffenbarungszeit von größenordnungsmäßig 1 s bei Bahnanwendungen	
			Zeit zur Weiterleitung von Telegrammen (Routing)	
	Initialisierungszeit	Zeit zum Einschalten der Wageräte (aus Standby)		
			Zeit zur Fertigstellung der Inauguration	10 - 20 Sekunden
	Betriebszeit	Fahrzeiten	ist nicht pauschalisierbar => Fahrprofil	
			Standzeiten	ist nicht pauschalisierbar => Fahrprofil

Abbildung 3.19: Paradigmatische Darstellung des Lastenhefts als Lastenheftmatrix

3.5 Grundsätzliche Systemstruktur

Aus den klassifizierten Anforderungen sowie dem Anforderungsquerschnitt resultiert eine grundsätzliche, funktional-technische Systemstruktur eines Kommunikationsgeräts entsprechend Abbildung 3.20.

Zentrale Systemkomponente eines Kommunikationsgeräts ist die Energieversorgung, welche die Komponenten Steuereinheit, Kommunikationseinheit und ggf. Sensorik mit elektrischer Energie versorgt.

Die Steuerung des Kommunikationsgeräts wird von einer zentralen Steuereinheit, z.B. durch einen Mikrocontroller, übernommen. Dieser steuert einerseits die Funktionen der Kommunikationseinheit, d.h. Aktivierung und Deaktivierung von Sende- und Empfangsmodus und Energiesparmoden sowie die Kommunikation zwischen Steuereinheit und Kommunikationseinheit und zwischen verschiedenen Kommunikationsgeräten. Andererseits verwaltet die Steuereinheit die Energieversorgung der Kommunikationseinheit und der ggf. vorhandenen Sensorik sowie die Auswertung der Sensorik selbst.

Für den Einsatzzweck der Ortung und Fahrtverfolgung (Tracking) ist ein Satelliten-navigations-Empfänger vorzusehen. Zusätzliche wagenspezifische und/oder ladungsspezifische Messgrößen erfordern den Einsatz von Sensorik im Kommunikationsgerät selbst. Für die Funktion der Aufzeichnung des Fahrprofils ist besonders im Hinblick auf eine Minimierung des Energiebedarfs der Einsatz eines Anfahrdetektors als Sensor sinnvoll (vgl. Abschnitt 7.1.4).

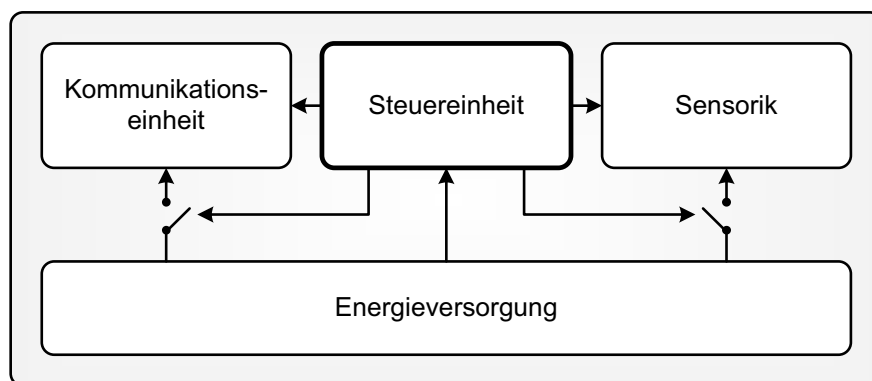


Abbildung 3.20: Grundsätzliche Systemstruktur des Gesamtsystems

Kapitel 4

Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik von Intrazug-Kommunikationssystemen im Eisenbahngüterverkehr und von Möglichkeiten der autarken Energieversorgung wagenseitiger technischer Systeme ermittelt. Dabei werden Anforderungen und Realisierungskonzepte aus Forschungsprojekten sowie Produkte und bestehende Patentansprüche eruiert und entwickelt. Die Qualität der bestehenden Anforderungen und/oder der Produkte sowie die Art der Patentansprüche entscheiden letztlich über den Einstiegspunkt in ein Entwicklungsmodell, d.h. die mögliche Adaption bestehender Realisierungskonzepte und -entwürfe. Als Beurteilungskriterien können dabei die Eigenschaften, Merkmale, Größen und Werte der des Anforderungsquerschnitts verwendet werden (vgl. Abschnitt 3.4).

Die Datenübertragung in Fahrverbänden, wie z.B. in Güterzügen, ist bereits in einer Reihe von existierenden Forschungsprojekten, Spezifikationen und Patenten definiert worden, welche die Kommunikation und die Initialisierung der Busstruktur sowie die Energieversorgung thematisieren, spezifizieren und beschreiben. Ein wichtiges Kriterium bei der Anforderungsdefinition war es, geschützte Verfahren nicht zu verletzen.

Der betriebsbedingte Stand der Technik ist zu definieren als die Vielfalt der realisierten Systeme, welche sämtliche betrieblichen Anforderungen (Normen, Vorschriften, Richtlinien) erfüllen. Systeme nur bezogen auf den betrieblichen Stand der Technik zu betrachten ist zwar grundsätzlich möglich, jedoch an dieser Stelle nicht sinnvoll, da jedes für den Bahnbetrieb zulassungsfähige technische System diese Anforderungen erfüllen muss. Es ist daher hinreichend, bahnzugelassene Systeme auf ihren technischen und funktionellen Stand der Technik zu analysieren.

4.1 Studien und Forschungsprojekte

Die funktionalen Aspekte eines zu entwickelnden Kommunikationssystems müssen den vorgegebenen Kundenanforderungen genügen. Funktional entsprechen die Ideen und

Teilergebnisse der Projekte *Freight Electronic Brake and Information System (FEBIS)* und *TrainLink* am ehesten den Vorgaben an das in dieser Arbeit zu entwickelnde Kommunikationssystem, jedoch werden hier unter funktionalen Aspekten lediglich diejenigen verstanden, die das Mensch-Maschine-Interface (*MMI*) und das transparente, d.h. nach Außen erkennbare Verhalten, betreffen. Die dafür bereitzustellenden Schnittstellen und weitere Verfahrensschritte werden hingegen unter den technischen Aspekten behandelt.

4.1.1 INTELFRET - Intelligent Freight Train

Das EU-Forschungsprojekt *Intelligent Freight Train (INTELFRET)* wurde von August 1997 bis Juni 1999 unter Federführung des ehemaligen European Rail Research Institute (ERRI) von bekannte Firmen und Institutionen, wie z.B. *Mannesmann Rexroth Pneumatik GmbH*, *Knorr-Bremse*, *SAB WABCO GmbH* und dem *Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik* der *Technischen Universität Braunschweig (IfRA)* bearbeitet [CORDIS 2000]. Ziel war die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit des Schienengüterverkehrs gegenüber dem Straßengütertransport durch die Analyse, Spezifikation und Realisierungskonzeption eines Systems mit folgenden Funktionalitäten zur Steigerung der Leistung, der Transportqualität, der Bereitstellung von Ladungs- und Wageninformationen und der Erhöhung der Verfügbarkeit und Sicherheit des Verkehrsträgers durch:

- Bremsfunktion
- automatische Kupplung der Fahrzeuge
- Wagenautomatisierung, -überwachung und -diagnose
- Frachtüberwachung
- Positionsbestimmung
- Informationsaustausch sowohl zugintern als auch zugextern, d.h. mit einem Service-Center
- Kundeninformationssystem
- Energieversorgung auf jedem Wagen

Innerhalb dieses Forschungsprojekts wurden die funktionalen und technischen Grundlagen (Funktionalitäten, Umweltbedingungen, Energieversorgungsbedingungen usw.) für weitere Forschungen und Entwicklungen, wie z.B. *FEBIS* und *TrainLink*, erarbeitet und definiert. Das *FEBIS*-Projekt hatte die Umsetzung der Anforderungen des *INTELFRET*-Projekts zum Ziel.

4.1.2 FEBIS - Freight Electronic Break and Information System

Die *Deutsche Bahn AG* und die französische Bahn *SNCF* erprobten seit dem Frühjahr 1999 gemeinsam mit Industriepartnern ein u.a. funkbasiertes Kommunikationssystem im Güterzug mit der Bezeichnung *FEBIS* zur Ermöglichung eines Datenaustausches zwischen allen Fahrzeugen im Zugverband und damit verteilter elektronischer Systeme im Güterzug, z.B. zur Realisierung der elektronisch gesteuerten Bremse. Das Ziel dieser Bestrebungen ist die Realisierung des „intelligenten Güterzuges“ [WITTE et al. 2000]. Ansätze dazu wurden bereits im EU-Forschungsprojekt *INTELFRET* erarbeitet und untersucht. Beispiele für solche Ansätze sind

- Systeme, die eine automatische Bestimmung der Zugzusammensetzung und der Zugeigenschaften ermöglichen, wie z.B. Reihenfolge, Ausrichtung und Art der Fahrzeuge
- Systeme, die eine elektronische Steuerung des Zuges (insbesondere der Bremse) ermöglichen
- Diagnosesysteme, z.B. zur Erfassung von Heißläufern oder Laufeigenschaften usw.

Die zwei zentralen Komponenten des FEBIS-Kommunikationssystems sind die elektrische Energieversorgung und das Datenkommunikationssystem zum Informationsaustausch zwischen den elektronischen Systemen im Zug und ggf. mit der Außenwelt. Wesentliche Applikationen sind dabei zum Einen die „Zuginitialisierung und Konfiguration“, die Daten über die Fahrzeugreihung, die Ausrichtung und die Art und Eigenschaften der Fahrzeuge bereitstellen kann, und zum Anderen die elektronisch gesteuerte Bremse, durch welche die Randbedingungen, wie z.B. Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Datenraten, an die Basissysteme gestellt werden. Dies impliziert weitere vitale Funktionalität, wie z.B. die Zugvollständigkeitsüberwachung, wozu die möglichst automatische Ermittlung des dafür erforderlichen Zugende-Geräts während der Initialisierungsphase oder sonst der Einsatz eines speziellen Endgerätes erforderlich ist.

Entgegen der im Personenschienenverkehr a priori vorhandenen durchgehenden elektrischen Leitung entlang des Zuges existiert diese im Schienengüterverkehr nicht. Zwei Lösungsansätze, nämlich eine leitungsgebundene oder eine energieautarke Energieversorgung, sind möglich. Die Energieversorgung erfolgt während der Entwicklung im *FEBIS*-Projekt über eine LON-Powerline-Datenübertragungsleitung. Später ist, entsprechend der Ergebnisse des *INTELFRET*-Projekts, der Einsatz eines Achsgenerators inkl. eines Energiespeichers vorgesehen.

Die Kommunikation innerhalb des Zuges kann wahlweise ebenfalls leitungsgebunden oder funkbasiert erfolgen. Die Nachteile einer durchgehenden elektrischen Leitung entsprechen denen der Energieversorgung (s.o.). Die heute gültige Begrenzung der Zuglänge auf max. 750 m in den sogenannten „DACH“-Ländern (Deutschland, Österreich und

der Schweiz) kann und soll gelöst, und die maximale Zuglänge könnte auf bis zu 2250 m mit bis zu max. 128 Fahrzeugen erweitert werden, was erst durch die Realisierung der elektronisch gesteuerten Pneumatikbremse möglich würde.

Innerhalb des *FEBIS*-Konzepts wurde festgelegt, dass jedes Fahrzeug im Zugverband mit einer Funkkommunikationseinheit (Funkknoten) ausgerüstet und mit der Elektrotechnik des Fahrzeugs gekoppelt wird. Die maximale Funkausgangsleistung wurde angestrebt mit max. 100 mW, wobei angrenzende Fahrzeuge in einem Abstand bis etwa 100 m erreichbar sein sollten. Für eine Datenübertragung über die gesamte Zuglänge ist somit die Realisierung von Weiterleitungs-Stationen, sogenannter Repeater-Knoten, erforderlich. Begleitend zur *FEBIS*-Entwicklung bei der *Deutschen Bahn AG* wurden zusammen mit der Fachhochschule Lippe Untersuchungen zur Charakterisierung des für die Funkübertragung vorgesehenen Funkkanals im 5,8 GHz-ISM-Band und zur Optimierung der Antennen sowie zur Bestimmung der optimalen Antennenposition am Fahrzeug durchgeführt, da bei den Bahnen bisher kaum Erfahrungen bezüglich dieses Funkkanals für den Einsatz an Güterzügen vorlagen [WITTE et al. 2001].

Die Frequenzbereiche 5,8 GHz und 2,45 GHz wurden untersucht und gegenübergestellt. Obwohl das 2,45 GHz-Band geringere Dämpfungswerte und einen geringeren Streubereich aufweist, was folglich größere Reichweiten bei gleicher Sendeleistung und den Einsatz „weniger hochwertiger“ Antennen als im 5,8 GHz-Band bedeutet, entschieden sich die Entwickler gegen diese und wegen des exklusiveren Frequenzbereiches für das 5,8 GHz Funkband. Die am besten geeignete Antennenposition am Zug für eine seitliche Anbringung befindet sich etwa 1,4 m über dem Erdboden und liegt damit im Bereich der Pufferhöhe [WITTE et al. 2001]. Vegetation in diesem Bereich wirkt sich, wie zu erwarten, negativ auf die Funkausbreitung aus und äußert sich in einer erhöhten Dämpfung. Entgegenkommende Züge und Mauern direkt am Funkkanal wirken sich hingegen nicht kritisch aus und können in einigen Metern Abstand durch konstruktive Interferenz sogar signalverstärkend wirken.

Als Struktur des Funkbusses wurde eine durch redundante Rückverbindungen erweiterte Baum-Funktionstopologie gewählt (vgl. Abschnitt 6.1.2). Als Telegrammstruktur sollte das *TrainTalk*-Protokoll zum Einsatz kommen. Nach Einschätzung in [MINDE und WITTE 2001] existierte im Jahre 2001 auch im Hinblick auf die ECP-Entwicklungen der AAR keine Systementwicklung, „mit der zum einen die gültigen Grenzen der pneumatischen UIC-Bremse für Güterzüge überschritten werden können, und zum anderen durch klare Trennung von Kommunikationssystem und Applikation ein offenes, erweiterbares System entsteht, das später Grundlage für weitere Anwendungen oder Automatisierungsschritte im Güterzug sein kann“.

Innerhalb des *FEBIS*-Projekts wurden wichtige technische Anforderungen an und Realisierungskonzepte für ein Kommunikationssystem für den Einsatz im Schienengüterverkehr definiert, über deren Umsetzung und Ergebnisse keine Informationen vorliegen.

Nach 2001 wurden keine Veröffentlichungen zu diesem Thema mehr publiziert. Es liegt somit die Vermutung nahe, dass das Projekt *FEBIS* ohne Ergebnis eingestellt wurde.

4.1.3 Machbarkeitsstudie IVSGV

Die Aspekte der Energieversorgung, des allgemeinen Nutzens sowie der zu erwartenden Auswirkungen auf den Modal-Split von an den Wagen von Güterzügen montierten Telematiksystemen wurden von Rieckenberg im Rahmen der Machbarkeitsstudie *Individualisierter Schienengüterverkehr (IVSGV)* für Kesselwagen und deren Einsatz im Schienengüterverkehr untersucht [HECHT 1999, HECHT et al. 1999, RIECKENBERG 2004a, RIECKENBERG 2004b].

Als wichtigste Vorteile wurden genannt:

- permanent nachverfolgbare Logistik
- ladungsspezifischer Nutzen
- lauftechnisch-sicherheitsrelevante Diagnose
- Erhöhung der Transportsicherheit
- Erhöhung der Wagenverfügbarkeit

Als Lösungsmöglichkeit schlug Rieckenberg ein Konzept für die Kommunikationsstruktur sowie ein Energieversorgungskonzept vor. Konkrete Lösungsvorschläge für die Sicherstellung einer Energieversorgung (Produktvorschläge) wurden nicht gegeben.

Folgende technischen Aspekte wurden betrachtet und beurteilt [HECHT und RIECKENBERG 2002]:

- Sensorik und -auswertung (Motor-, Motorsteuerungs- und Betriebsmittelüberwachung)
- Laufwerksdiagnose (Entgleisungsdetektion, Radsatzlager- und Bremsdiagnose)
- Definition der onboard-Diagnose (z.B. Vormeldung von Wartungsbedarf)
- Elektrische Energieversorgung und Konzeptideen zur Realisierung
- Kommunikationskonzept (Technologie, zentrale Kommunikation mit Betreiber per GSM/GSM-R u.ä.)
- Selbstortung per GPS zur Ladungsverfolgung
- Eingriffskonzepte im Fehlerfall bzw. bei Wartungsbedarf

Bezüglich des Bedarfs und damit der Bereitstellung elektrischer Energie waren die Anforderungen des *IVSGV*-Waggons im Vergleich zu den Anforderungen an das in dieser Arbeit zu entwickelnde Kommunikationssystem sehr anspruchsvoll. Der Energiebedarf für den Betrieb der Sensorik betrug ca. 1,92 Ah pro Tag, was die Erzeugung und Speicherung elektrischer Energie direkt am Wagen erforderlich machte. Für den *IVSGV*-Versuchsträger kam die manuelle Nachladung ebenfalls in Frage, was jedoch aus Kundensicht grundsätzlich unzulänglich und unerwünscht ist.

Für die erforderliche Energiegewinnung für den Betrieb des Telematiksystems auf einem Güterwagen wurden zwei grundsätzliche Arten vorgeschlagen:

1. **Nutzung der Akkumulatoren des Fahrmotors**

Dies ist sowohl bei Vorhandensein eines Verbrennungsmotors, als auch eines elektrischen Antriebes möglich. Die Nutzung einer Brennstoffzelle des elektrischen Antriebes wurde ebenfalls vorgeschlagen.

2. **Autarke Energieversorgung**

Hier kamen Solarzellen, herkömmliche und neuartige Achsgeneratoren, Windräder und Brennstoffzellen in Betracht.

Für die Energiespeicherung wurden herkömmliche Blei-Gel-Akkumulatoren für den Einsatz in der Solartechnik ausgewählt. Allerdings war nur ein Fahrprofil Grundlage für die Abschätzung des benötigten Energiebedarfs und auch -angebots, welches eine Bewegungszeit von 6 Stunden pro Tag vorsieht [HECHT und RIECKENBERG 2002].

Die Forschungen hatten zwar die Entwicklung eines intelligenten Güterwagens als Ziel, jedoch nicht die Entwicklung eines sogenannten „intelligenten Güterzuges“, d.h. eine Intrazugkommunikation war nicht vorgesehen. Es ist daher evident, dass die Anforderungen bezüglich der Kommunikation nicht auf die des zu realisierenden Kommunikationssystems übertragbar sind.

4.1.4 TrainTalk

Die Firma *GE Harris* erarbeitete eine Reihe von Spezifikationen, welche Anforderungen und Aufbau eines Kommunikationssystems für drahtlose Kommunikation auf Güterzügen beschreiben, um eine zugweiten Kommunikation zu ermöglichen [(AAR) 2000, (AAR) 1999c, (AAR) 1999a, (AAR) 1999b, (AAR) 2002]. Die offene Architektur forderte primär die Übertragung von sicherheitsrelevanten Daten zur Betätigung elektropneumatisch gesteuerter Bremsen (ECP-Brakes/ECPB) nach AAR-Standard, sowie zur Kopplung mehrerer Zugfahrzeuge zu einer Mehrfachtraktion. Die sekundäre Übertragung von nicht sicherheitsrelevanten Statusdaten oder Abfragebefehlen sollte damit ebenso möglich sein.

Das Kommunikationssystem besteht aus einem Gerät am Zuganfang (*Lead Head End*)

Unit - Lead HEU), also meist auf der Lokomotive, mindestens einem Wagengerät (*Car Control Device - CCD*) und einem Zugschluss-Gerät (*End Of Train Device - EOT Device*). Gegebenenfalls können sich noch ein oder mehrere *Trail Head End Units (Trail HEU)* im Netz befinden. Ein *Lead HEU* befindet sich auf der führenden Lokomotive, koordiniert den Netzwerkverkehr, stellt unter anderem eine Bedienungsschnittstelle für den Lokomotivführer bereit, überwacht den Systemstatus und reagiert entsprechend auf Fehler. Die Energieversorgung der einzelnen Fahrzeug-Einheiten erfolgt lokal durch Achsgeneratoren. Da die Fahrzeug-Einheiten eine Bremsensteuerung und -überwachung übernehmen sollen, sind sie mit dem Druckluftbremssystem verbunden.

Zur präzisen und individuellen Dosierung der Bremsanstellkraft, abhängig von der Position des Fahrzeugs im Fahrverband, ist die Kenntnis der Fahrzeugreihung erforderlich. Es ist unbedingt zu vermeiden, dass alle Bremsen im Fahrverband zeitgleich angelegt werden, da dadurch der Zug auseinandergerissen werden könnte.

Die Reihungsermittlung der mit Fahrzeug-Einheiten ausgerüsteten Wagen im Fahrverband erfolgt unmittelbar vor der Abfahrt durch Überwachung und Auswertungen der Druckveränderungen im Druckluftbremssystem. Eine beim sogenannten „Auto Linking“ durch das *Lead HEU* initiierte Druckänderung von 75 ± 25 Millisekunden Dauer pflanzt sich mit ca. 250 m/s im Druckluftbremssystem fort, wird von den Fahrzeug-Einheiten detektiert und anhand der Detektionszeiten die Reihung der ausgerüsteten Wagen festgelegt.

4.1.5 TrainLink

Im Rahmen des Forschungsprojekts *TrainLink* sind in Zusammenarbeit mit dem *Institut für elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik* der *Technischen Universität Braunschweig (emg)* und der *Siemens AG* in Braunschweig Teile der Spezifikationen des *INTELFRET*-Forschungsprojekts sowie das Patent [TALKE und WIE-MERS 2002a] auf Basis der DECT-Funktechnologie auf Realisierbarkeit untersucht worden [BOCK 2001] (vgl. Abschnitt 4.3.1).

Dabei wurden nach der Hardwareauswahl ausführliche Untersuchungen zu den Funkausbreitungsbedingungen sowohl entlang eines stehenden, als auch entlang eines fahrenden Zuges in Tunneln, unter Brücken, mit Hindernissen im Übertragungsweg und bezüglich des Einflusses der relativen Geschwindigkeit durchgeführt. Es offenbarten sich die mögliche Übertragungsverlässlichkeit und die Schwächen des Kommunikationssystems.

Die wesentlichen technischen Anforderungen an das TrainLink-System waren dabei:

- Nutzung eines frei zugänglichen, kostenfreien und gut verfügbaren Frequenzbandes

- Nutzung eines internationalen Funkstandards
- Geringe Modulkosten bei geringer Baugröße
- Übertragungsrate bis 30 kBit/s
- Überbrückung von Entfernungen bis zu 3 km (mit geeigneter Topologie und geeignetem Routingverfahren)
- Festigkeit für Einsatz im bahntechnischen Umfeld entsprechend der Bahnnormen (el. und mech. Störungen, Klima usw.)
- Schrittweise Einführung muss möglich sein, d.h. auch ein nicht vollständig mit TrainLink ausgerüsteter Zug muss als Kommunikationseinheit mindestens mit dem ausgerüsteten Wagen verfügbar sein
- Nutzung der DECT-Technologie durch Einsatz kostengünstiger Baugruppen aus DECT-Schnurlostelefonen der Siemens AG
- Realisierung standardisierter Schnittstellen für fahrzeugseitige Sensorik (z.B. Temperatur, Druck, Beschleunigung) und Aktorik (z.B. Bremsprüfung, Zugschluß, automatische Zugkupplung)
- Autarke Energieversorgung mit einem Energie-Management für mindestens ein Jahr
- Sicherheit gegen Vandalismus und Diebstahl

Als Technologie kam DECT mit einer erweiterten Bus-Topologie zum Einsatz (vgl. Abschnitt 6.1.2). Die Initialisierung des Zugbusses wird von der Hauptkomponente auf der Führungslokomotive gesteuert, wofür sie zu Beginn Kenntnis über die Zugehörigkeit und Reihung der weiteren Komponenten des Zugverbandes besitzen muss. Entweder kommt dabei eine vorgegebene (hardcodierte) Topologie oder eine dynamische Initialisierung anhand ausgewählter Parameter (Verbindungsqualität, Feldstärke o.ä.) zum Einsatz. Die Anmeldung eines DECT-Clients an einem DECT-Master ist für die Initialisierung eines Zugbusses technologisch problematisch, da der jeweilige DECT-Master aktiv nach neuen Teilnehmern suchen muss. Dieses Vorgehen ist von DECT-Telefonen im Heimgebrauch bekannt.

Die volle mögliche Distanz der Zuglänge von 700 m kann funktechnisch nicht überbrückt werden. Daher müssen Relais- oder Routingstationen innerhalb des Zuges, d.h. die sogenannten DECT-Zellen-Master, zumindest während der Initialisierungsphase und während des Betriebes (also während der Fahrt) permanent aktiv sein. Dies bedeutet einen großen Energiebedarf. Des weiteren existieren parallel zueinander mehrere DECT-Basen, an die sich die DECT-Clients anmelden könnten. Das Problem der automatischen Bewertung, welcher DECT-Client sich an welcher DECT-Basis anmelden soll,

sowie das Problem der automatisierten dynamischen Initialisierung sind nicht gelöst. Die Energieversorgung wurde per durchgehender Kabelverbindung sichergestellt [SCHIMANSKI 2003, ETSI 2003a, ETSI 2003b, ETSI 2003c].

Nach Abschluss der Projektarbeit war die autarke Energieversorgung nicht realisiert. Für die Realisierung einer leitungsgebundenen Energieversorgung war die Ausrüstung jedes Fahrzeugs des Fahrverbands erforderlich. Die Probleme einer leitungsgebundenen Energieversorgung wurden dabei unter anderem während der praktischen Versuchsphase deutlich. Der Ausfall der Energieversorgung oder eine Leitungsunterbrechung an einem Wagen hat den Ausfall der nachfolgenden Komponenten zur Folge, und mit zunehmender Länge des Zuges wirkt sich auch der Spannungsabfall entlang der elektrischen Leitung negativ aus, was wiederum die Anpassung der Speisespannung und -leistung sowie ggf. den Einsatz von Pufferbatterien notwendig macht.

Somit sind die wichtigsten Anforderungen für das zu entwickelnde Kommunikationssystem, nämlich die automatische Initialisierung und die autarke Energieversorgung, nicht erfüllt und realisiert worden.

4.2 Marktreife Produkte

Gerade im Bereich der Telematikanwendungen im Schienengüterverkehr besteht großes Potenzial für die Ladungsverfolgung und Disposition. Exemplarisch werden die zwei marktverfügbaren Produkte *ATIS MT* der Firma *Timtec Telematik* und *OPTIVIA* der Firma *Bombardier Transportation* analysiert. Dabei wird deutlich, dass der Fokus dieser Systeme auf der Extrazugkommunikation liegt, d.h. Kommunikation per GSM oder VHF mit einer Dispositionszentrale. Eine Intrazugkommunikation ist nicht vorgesehen.

4.2.1 *ATIS MT*

Die Firma *Timtec Teldatrans GmbH*, eine Fusion der Unternehmen *Timtec Telematik GmbH* und der *OHB Technology AG*-Tochter *Teldatrans*, bietet eine Telematiklösung für Güterwagen an. Für Auftragnehmer bildet die Gewinnung zeitgemäßer und rechtzeitiger Informationen die Basis für die im Wettbewerb der Transportträger wichtige Kundenzufriedenheit und somit für die Verschiebung des Modal-Split zu Gunsten des Verkehrsträgers Bahn. Aus Sicht des Auftraggebers bedeutet dies die Möglichkeit eines transparenten Transports [BARANEK 2001].

Der modular aufgebauten, fernkonfigurierbaren Systemlösung *ATIS MT* liegt das Konzept der Ladungsortung, -verfolgung und -überwachung durch einen Bordcomputer mit entsprechender Sensorik, Kommunikationstechnik und Energieversorgung zu Grunde. Es können Sensoren für die Positionsermittlung (GPS) sowie für die Ermittlung der Laufleistung, des Beladungszustandes, der Laderaum- und Ladeguttemperatur, der

Stoßbelastung, der Tür-, Druck- und Dichtigkeitsüberwachung und des Bremsenverschleißes angebunden werden.

Die Energieversorgung soll durch eine 12 V Sekundärzelle, zur Ermöglichung einer Standzeit von ca. 24 Monaten, sowie ggf. eine Nachladetechnik (z.B. Generator, Solarpaneele, Zugbus) erfolgen (vgl. Abschnitt 4.1.3). In Kombination mit einer Nachladetechnik wird eine Standzeit von bis zu sechs Jahren gewährleistet.

Eine Intrazugkommunikation ist auch bei diesem System nicht vorgesehen. Die Kommunikation erfolgt über terrestrischen Datenfunk (GSM, GSM-R, GPRS, UMTS) oder Satellitenfunk. Derartige Systeme werden heute von der Firma *Knorr Bremse Sfs GmbH* unter dem Namen NavMaster-RT vertrieben.

4.2.2 *OPTIVIA*

Die Firma *Bombardier Transportation* bietet ein modulares, GPS-basiertes Telematiksystem namens *OPTIVIA* an, welches ursprünglich für den Einsatz im Bereich von Werkslokomotiven von Industriebahnen entwickelt wurde [SCHMIDT und HOLZMÜLLER 2002]. Es diente vorwiegend der Ortung und Fahrwegverfolgung innerhalb eines Werksgeländes und wurde erweitert um die Einsatzmöglichkeit auf öffentlichen Gleisstrecken. Die Positionsermittlung erfolgt mittels eines GPS-Positionsempfängers, welcher zur Erhöhung der Qualität der Positionsermittlung mit einem Radimpulsgeber kombiniert wurde. Die Kommunikation der Lokomotiven mit dem sogenannten *OPTIVIA Radio Center* erfolgt innerhalb des Werksgeländes mittels VHF-Modem mit einem Funkbereich von 137-174 MHz und einer Ausgangsleistung bis zu 5 Watt, und außerhalb des Werksgeländes mittels GSM-Modem.

Über die Art der Energieversorgung des Telematiksystems sind keine Informationen vorhanden, es wird jedoch vermutlich direkt aus dem Bordnetz der Lokomotiven versorgt.

Eingesetzt werden dementsprechend ausgerüstete Lokomotiven bei der Firma *voestalpine Stahl*. Täglich übernehmen zwei Züge den Transport von Kalk aus dem Kalkwerk Steyrling nach Linz. Die Abwicklung dieses Transports führt über das Gleisnetz der Österreichischen Bundesbahnen (*ÖBB*), weshalb auf diesen Streckenabschnitten kein VHF-Werksfunk verwendet werden darf.

Eine Intrazugkommunikation ist nicht vorgesehen.

4.3 Geschützte Verfahren und Patentansprüche

4.3.1 Datenübertragungseinrichtungen für einen Wagenverbund

Auf nationaler und europäischer Ebene wurden im Januar 2002 zwei Patente von [TALKE und WIEMERS 2002b, TALKE und WIEMERS 2002a] zu dem Thema „Datenübertragungseinrichtungen für einen Wagenverbund“ erteilt. Sie beschreiben eine Datenkommunikationseinrichtung, bestehend aus mindestens vier Einrichtungen für ein Führungsfahrzeug und mehrere weitere Fahrzeuge, wobei die Kommunikation uni- oder bidirektional erfolgen kann. Funktechnisch werden mindestens zwei in Zugrichtung räumlich aufeinander folgende Funkzellen gebildet, wobei in jeder mindestens eine Master- und mindestens eine Slave-Funkeinrichtung vorhanden ist. Ein Master kommuniziert mit den Slaves der jeweiligen Funkzelle, sowie mit den Mastern der in Richtung Führungswagen (falls vorhanden) und in Richtung Zugende (falls vorhanden) nächstliegenden Funkzelle.

Die Kommunikationseinrichtung auf dem Führungsfahrzeug soll über einen Datenspeicher verfügen, in dem die Topologie, d.h. Konfiguration, welche der übrigen Funkeinrichtungen als Master und welche als Slave arbeiten oder arbeiten sollen, abspeicherbar ist. Die Zuordnung der Teilnehmer zu den jeweiligen Funkzellen, d.h. also die Inauguration der Datenkommunikation, soll auf Basis von Feldstärkemessungen erfolgen, wobei immer eine möglichst große Anzahl von Slave-Teilnehmern pro Funkzelle erreicht werden soll. Die Baum-Funktionstopologie wird in diesem Zusammenhang auch als „Verkettete Zellen“ oder „Chained Cells“ bezeichnet.

Dieses Verfahren ist Basis des *TrainLink*-Systems (vgl. Abschnitt 4.1.5).

4.3.2 Drahtlose Datenerfassung und Datenübertragung für ein zusammenhängendes mobiles System

Das Patent von [MAYS und WESLEY 2003] beansprucht eine Methode zur Aufnahme und Übertragung von Daten eines Wagenverbundes für jedes Fahrzeug des Wagenverbunds, so dass zumindest ein teilweise busgekoppeltes Gebilde entsteht, wobei mindestens eine Betriebsgröße jedes Wagens übertragen wird und die Übertragung nach einer um redundante Verbindungen erweiterten Bus-Funktionstopologie („Multiple Ruled Chain - next neighbour“) stattfindet.

Die Firma *GE Harris* hat Anforderungen und Aufbau eines Kommunikationssystems für die drahtlose Kommunikation auf Güterzügen entsprechend [MAYS und WESLEY 2003] definiert und mehrere Spezifikationen dazu erstellt. Eine Reihungsermittlung soll demnach durch Detektion eines durch das Bremssystem laufenden Druckluftimpulses erfolgen.

Dies ist eine theoretische Lösung, welche jedoch nicht für die Verwendung in dem zu entwickelnden Kommunikationssystem in Frage kommt.

4.4 Zusammenfassende Bewertung

Kommunikationssysteme und Produkte zur Ladungsverfolgung und für Telematikanwendungen, z.B. *ATIS MT*, sind am Markt verfügbar, wobei jedoch lediglich eine Kommunikation mit einer dispositiven Einrichtung, z.B. bei einem Spediteur oder dem Wagenvermieter, unter Nutzung des GSM-Netzes bzw. VHF-Werksfunk vorgesehen ist. Der Wunsch nach einem System zur Intrazugkommunikation besteht bei den Bahnbetreibern und so wurden die grundsätzlichen Anforderungen an ein System zur Intrazugkommunikation im EU-Forschungsprojekt *INTELFRET* erarbeitet und Realisierungskonzepte entwickelt. Zeitnah wurde das Forschungsprojekt *FEBIS* initiiert, welches die Umsetzung dieser Realisierungskonzepte als erklärtes Ziel hatte.

So euphorisch diese Entwicklungen in den Jahren 1999 bis 2002 begonnen wurden, so ergebnislos wurden diese eingestellt. In dem Projekt *FEBIS* wurde als Lösung für die Energieproblematik der Einsatz eines Radsatzgenerators in Kombination mit einem Energiespeicher, wie z.B. Pufferbatterien, vorgesehen. Für die Kommunikation sollte das 5,4 GHz-ISM-Band genutzt werden. Die automatische Businitialisierung stellt dabei nach wie vor ein ungelöstes Problem dar.

In den bis zum Jahre 2004 dauernden Forschungen im *TrainLink*-Projekt wurde die autarke Energieversorgung nicht realisiert, und als Kommunikationssystem wurde DECT unter Verwendung einer Funkzellentopologie nach [TALKE und WIEMERS 2002a] gewählt. Eine leitungsgebundene Energieversorgung ist in dem in dieser Arbeit zu entwickelnden Kommunikationssystem explizit nicht gefordert und gewünscht, obwohl ein Vorteil die einfache Beurteilung der Zugintegrität wäre.

Der Stand der Technik der betrachteten Forschungsprojekte, Systeme und geschützter Verfahren wurde anhand der Anforderungsklassifizierung (vgl. Kapitel 3) bewertet (siehe Abbildung 4.1). Die Bewertung erfolgte anhand dreier Bewertungsstufen, d.h. eine in den Anforderungen an das zu entwickelnde Kommunikationssystem definierte Eigenschaft kann ungeklärt, unbekannt oder unzureichend erfüllt sein, was durch ein „–“ gekennzeichnet wird. Eine theoretische Erarbeitung bzw. eine nicht vollständig abgedeckte und daher nicht übertragbare Eigenschaft wird durch „(√)“ ausgedrückt. Eine Erfüllung der Anforderung wird durch „√“ visualisiert.

Die Bewertung ergab, dass aus heutiger Sicht kein die Anforderungen erfüllendes System existiert, welches energieautark ist und eine automatisch aufbauende Bustopologie (Inauguration) für eine Intrazugkommunikation bietet.

Gesamtsystem			INTELFRET	FEBIS	IVSGV	TrainTalk	TrainLink	ATIS MT	OPTVIA	DE 100 291 26	US 6 668 2 16
Eigenschaft	Merkmal										
Systemanforderungen	Datenkanal		(v)	(v)	•	✓	✓	•	✓	(v)	(v)
	Strukturelle Anf.		(v)	(v)	•	•	✓	•	•	•	(v)
	HF-Kanal		(v)	(v)	(v)	•	✓	•	•	(v)	(v)
	KommunikationsHW		•	•	•	•	✓	(v)	•	•	•
	RAMS(S)		(v)	(v)	(v)	(v)	•	•	•	•	•
	autom. Inauguration		•	•	•	(v)	•	•	•	•	•
Funktionale Anforderungen	Meldungen		(v)	(v)	•	(v)	✓	(v)	(v)	•	(v)
	Alarmer		(v)	(v)	•	(v)	✓	(v)	(v)	•	(v)
	Interaktion		(v)	(v)	•	(v)	✓	•	(v)	•	(v)
Geometrische Anforderungen	KommunikationsHW		(v)	✓	✓	(v)	✓	✓	✓	•	•
Anforderungen an die Umweltbedingungen	geografisch		(v)	(v)	✓	(v)	✓	✓	(v)	•	•
	klimatisch		(v)	(v)	✓	✓	✓	✓	✓	•	•
	mechanisch		(v)	(v)	✓	✓	✓	✓	✓	•	•
	Strahlung		(v)	(v)	(v)	(v)	✓	✓	(v)	•	•
	chemisch & biologisch		(v)	(v)	✓	(v)	✓	✓	(v)	•	•
	Fremdkörper		(v)	(v)	✓	✓	✓	✓	✓	•	•
	EMV		(v)	(v)	✓	(v)	(v)	✓	✓	•	•
Elektrische Anforderungen	Energieerzeugung		(v)	(v)	✓	•	•	(v)	•	•	•
	Powermanagement		•	•	✓	•	•	✓	•	•	•
	Spannungsfestigk.		(v)	✓	✓	(v)	✓	✓	(v)	•	•
	Stromfestigkeit		(v)	✓	✓	(v)	✓	✓	(v)	•	•
	ESD		(v)	✓	✓	(v)	✓	✓	(v)	•	•
	Energieautarkheit		(v)	•	✓	(v)	•	✓	•	•	•
Zeitliche Anforderungen	Kommunikationszeit				✓	•	✓	•	•	•	•
	Initialisierungszeit			•	✓	(v)	(v)	•	•	•	(v)
	Betriebszeit		•	•	(v)	•	•	(v)	(v)	•	•
Für TrainLink ² relevante Kriterien			(v)	(v)	•	•	•	•	•	•	•
✓ realisiert (v) theoretisch erarbeitet • ungeklärt, unbekannt oder unzureichend nicht zutreffende Kriterien werden mit – gekennzeichnet.											
Anforderungen an Kommunikation und Energieversorgung weitgehend deckungsgleich zu den in Kapitel 3 definierten Anforderungen, jedoch Baufaktor zu groß, EV überdimensioniert											
Anforderungen an Energieversorgung ähneln den in Kapitel 3 definierten Anforderungen, jedoch überdimensioniert											
nicht energieautark											
Energieautark aber keine Intrazug-kommunikation											
Theoretische Verfahrensbeschreibung. Keine Anforderungen und Lösungsansätze											

Abbildung 4.1: Bewertung des Stands der Technik bezüglich des Anforderungsquerschnitts

Kapitel 5

Betriebliche Bedingungen und Energieversorgung

Eine durchgehende elektrische Leitung zur Energieversorgung ist in Güterzügen nicht praktikabel. Gründe sind die notwendige händische Sicherstellung der Stromversorgung beim Koppeln der Wagen, die mangelnde Zuverlässigkeit der Steckerverbindungen zwischen den Wagen sowie vor allem die in diesem Falle bestehende Notwendigkeit der Ausrüstung sämtlicher Fahrzeuge eines Fahrverbands, auch derjenigen ohne vorhandene Kommunikationseinrichtung.

Bezüglich Realisierungsmöglichkeiten und Nutzungsszenarien der Energieversorgung von elektrischen Geräten auf Güterwagen wird der Energiebedarf in Abschnitt 5.2 überschlägig berechnet. Der Energiebedarf setzt sich zusammen aus dem Energiebedarf der Komponenten Funkkommunikation, Ortung und Steuerung (vgl. Abschnitt 3.5), wobei Sensorik an dieser Stelle nicht betrachtet wird.

Die Energieerzeugung auf dem Güterwagen kann mit einem oder mehreren unterschiedlichen Energiequellen, gegebenenfalls mit einem Energiespeicher und unter Einsatz eines konsequenten Energiemanagements mit Teilsystemabschaltung und Standby-Betrieb realisiert werden (vgl. Abschnitte 4.1.1 und 4.1.2). Das Kommunikationssystem soll innerhalb eines Revisionsintervalls von typischerweise sechs Jahren wartungsfrei sein.

Die Herausforderung bei der Dimensionierung der Energieversorgung besteht in den Wechselwirkungen zwischen Energiebedarf und -angebot. Der Energiebedarf wird durch die Hardwarekomponenten, deren Auswahl von dem abgeschätzten Energieangebot abhängig ist, sowie deren Nutzungsprofil bestimmt. Anders herum ist die Zulänglichkeit möglicher Energiequellen erst unter Betrachtung des Energiebedarfs konkreter Hardware sinnvoll zu ermitteln. Es muss also sichergestellt sein, dass die Energieversorgung für einen exemplarischen Energiebedarf mit vertretbarem Aufwand realisierbar ist - ein klassisches Henne-Ei-Problem.

Zunächst wurden die Anteile der Verkehrsarten am Schienengüterverkehr sowie die Transportentfernungen in Abschnitt 5.1 ermittelt. Für die drei Hauptverkehrsarten (vgl. Tabelle 5.1) werden repräsentative Fahrprofile mit spezifischen Fahr- und Standzeiten sowie der Frequenz der Fahrten erarbeitet.

Für den Dauerbetrieb (vgl. Abschnitt 5.2) und schließlich für einen Betrieb entsprechend der Energiebedarfsprofile (vgl. Abschnitt 5.3) wurde der Energiebedarf pro Jahr sowie pro typischem Revisionszyklus eines Güterwagens, d.h. Wartungsintervall, von sechs Jahren überschlägig berechnet. Läge der ermittelte Energiebedarf aus Kosten/Nutzen-Sicht außerhalb des Rahmens, so wäre dies ein Ausschlusskriterium für die weitere Entwicklung.

Die überschlägige Energiebetrachtung bezieht sich auf den Betrieb der Kommunikationsgeräte ohne Verwendung von Sensorik. Als Sensorik sind hier z.B. Anfahrtsdetektoren, Vibrations- und Schocksensoren zur Entgleisungsdetektion und Ladungsüberwachung, Türkontakte, Temperatur- und Drucksensoren, Radarsensoren zur Geschwindigkeitsermittlung zu nennen. Die Konfiguration, welche Sensorik Bestandteil des Kommunikationsgerätes ist, ist kundenspezifisch und kann an dieser Stelle noch nicht abgeschätzt werden. Betrachtungen zum Energiebedarf von an den Wagen montierter Sensorik finden sich in [CORDIS 2000] und [RIECKENBERG 2004b].

Auch wenn die Energiebetrachtung für Kommunikationsgeräte mit integrierter Sensorik an dieser Stelle nicht möglich ist, so müssen Möglichkeiten der Energieversorgung auch für größere Energiebedarfe analysiert werden. Es wurde daher die Energieversorgung mittels Energiequellen und -speichern auf einem Wagen geprüft. Dazu werden in Abschnitt 5.4 Energiequellen und in Abschnitt 5.5 Energiespeicher bezüglich ihrer Einsatzmöglichkeiten für die Verwendung in einem Energieversorgungssystem auf Güterwagen untersucht und anhand der in Abschnitt 3.3.3 ermittelten Anforderungen bewertet.

Folgende Energiequellen wurden hinsichtlich der in der Entwicklungsphase des Requirements Engineering analysierten Anforderungen, des Wirkungsgrades sowie der Markt- und Produkt-Verfügbarkeit gegenübergestellt und danach in Abschnitt 5.4.12 nach relevanten Kriterien entsprechend der klassifizierten Anforderungen (vgl. Abschnitt 3.3.3) bewertet:

- Unterschiedliche Typen von Primärbatterien als Vertreter der elektrochemischen Energiequellen
- Achsgeneratoren unterschiedlicher Technologien als typische Vertreter der rotatorischen, elektromechanischen Energieerzeuger
- Feder-Masse-, Feder-Magnet-Schwinger und seismischer Schwingmassengenerator

als Vertreter der induktiven Energieerzeuger

- Luftdruckgeneratoren
- Flügelwindrad und Savoniusrotor
- Unterschiedliche Typen von Solarzellen als Vertreter der photoelektrischen Generatoren
- Unterschiedliche Typen von Brennstoffzellen

5.1 Güterbereiche und Transportentfernungen

Für die Erarbeitung exemplarischer Energiebedarfs- und -angebotsprofile wurde der Modal-Split betrachtet sowie die Aufteilung der Güterbereiche und Transportentfernungen im nationalen und internationalen Umfeld und für Privatbahnen. Anhand der Häufigkeiten wurden drei Einsatzszenarien entwickelt, die die Grundlage für die Dimensionierung der Energieversorgung bilden. Für die sinnvolle Auswahl repräsentativer Szenarien diente die „Marktstudie Schienengüterverkehr“ [ALLES 1999].

Die Transportentfernung eines Fahrverbandes (Zuges) besitzt eine Abhängigkeit vom spezifischen Zugtyp, d.h. nach dem beförderten Gut, sowie von der Verkehrsart, d.h. Ganzzugverkehr, nationaler oder internationaler Verkehr.

5.1.1 Güterbereiche und Transportentfernungen im nationalen Umfeld

Die transportierten Gutarten des größten deutschen Bahnbetreibers und -spediteurs für Güterverkehr, der *Deutschen Bahn AG Cargo (DB Cargo)* verteilen sich wie in Tabelle 5.1 dargestellt [ALLES 1999].

Anteil	Gutart	Beispiele
49,6 %	Montan	z.B. Kohle, Stahl
17,5 %	Chem. Produkte	z.B. Gefahrgüter, Mineralöl
16,0 %	Industriegüter	z.B. Fertig- und Halbfertigprodukte
13,6 %	Baustoffe & Entsorgung	z.B. Beton, Müll
3,3 %	Land- & Forstwirtschaft	z.B. Holz

Tabelle 5.1: Anteil der Güterbereiche am Verkehrsaufkommen der DB Cargo [ALLES 1999]

Montan wird typischerweise mit Ganzzügen transportiert, so dass das erste mögliche Einsatzszenario den Ganzzugverkehr abdeckt. Dieses wird aufgrund fehlender Datenbasen durch Ganzzüge der *Hupach AG* substituiert.

Chemische Produkte werden vor allem im Einzelwagenverkehr transportiert. Anhand von Daten eines großen Chemiekonzerns, der *Badischen Anilin und Sodafabrik Aktiengesellschaft (BASF AG)*, konnte dieses Szenario entwickelt werden.

Weiterhin soll das zu realisierende Kommunikationssystem auch dem Einsatz im Werksschuttverkehr genügen, z.B. bei der *BASF AG*, der Volkswagen AG Transport (*VAG Transport*), der *DuisPort Rail* sowie bei Betreibern von Kohletransportzüge. Es konnten an dieser Stelle ebenfalls Daten der *BASF AG* genutzt werden und das Szenario anhand des sogenannten Germersheim-Shuttles entwickelt werden.

Im Gegensatz zu den Ganzzügen der Rollenden Landstraße der *Hupach AG* weisen die Ganzzügen von Privatbahnen relativ geringe Transportentfernungen unter 100 km auf.

5.1.2 Güterbereiche und Transportentfernungen im internationalen Umfeld

Schienengüterverkehrsunternehmen, die in einem EU-Land zugelassen sind, dürfen grenzüberschreitende Güterverkehrsdienstleistungen innerhalb der EU erbringen. Dies gilt für alle Betreiber, die bestimmte technische und wirtschaftliche Auflagen erfüllen und beschränkt sich nicht auf die großen nationalen Bahnen. Der Zugang ist nicht auf allen Strecken möglich, sondern beschränkt sich im Wesentlichen auf die Hauptstrecken des transeuropäischen Schienengüterverkehrsnetzes.

Die für die Bestimmung des Energieangebots und -bedarfs maßgeblichen Anteile des Schienengüterverkehrs an der Verkehrsleistung des Verkehrsträgers Bahn in Deutschland teilen sich dabei wie in Tabelle 5.2 dargestellt auf. Der Schienengüterverkehr trägt dabei einen Anteil von 12 % am internationalen Verkehr. Die mittlere Transportentfernung des Schienenverkehrs der *DB AG* beträgt 250 - 290 km.

Anteil	Verkehrsart
69,9 %	Binnenverkehr
12,6 %	Quellverkehr
14,4 %	Zielverkehr
3,1 %	Transitverkehr

Tabelle 5.2: Anteile der Verkehrsart am Schienengüterverkehr [ALLES 1999]

Der Begriff Quellverkehr bezeichnet den Anteil des Verkehrs, der in der betrachteten Verkehrszelle, in diesem Fall Deutschland, beginnt und aus dieser herausfährt. Der Begriff Zielverkehr bezeichnet demgegenüber den Anteil des Verkehrs, der in benachbarten Verkehrszellen beginnt und in die Zielzelle hineinfährt. Beispiele hierfür sind z.B. die

Züge der Rollenden Landstraße. Der Schienentransitverkehr stellt eine untergeordnete Position dar.

5.2 Energiebedarfsabschätzung für Energieversorgung mit Primärbatterien

Die intuitivste Energiequelle für die Energieversorgung sind Primärbatterien. In einem ersten Schritt wird der Energiebedarf für den ununterbrochenen Betrieb eines Fahrzeuggeräts für ein Revisionsintervall abgeschätzt. Es gelten die Annahmen aus der Einleitung des Kapitels 5. Energiesparmodi sollen keine Relevanz haben. Rechnerisch ergeben sich folgende Werte:

$$P_{\text{Betrieb}} = P_{\text{GPS}} + P_{\text{Kommunikation}} + P_{\mu C}$$

$$P_{\text{Betrieb}} = (80\text{mA} \cdot 5\text{V}) + (50\text{mA} \cdot 5\text{V}) + 100\text{mW} = 750\text{mW}$$

$$W_{\text{Betrieb, Jahr}} = P_{\text{Betrieb}} \cdot t_{\text{Betrieb, Jahr}} = 6,57 \text{ kWh pro Jahr}$$

$$W_{\text{Betrieb, Wartungsintervall}} = P_{\text{Betrieb}} \cdot t_{\text{Betrieb, Wartungsintervall}} = 39,42 \text{ kWh in 6 Jahren}$$

Es zeigt sich, dass mit den angenommenen Werten für den Betrieb eines solchen Geräts über ein Wartungsintervall eines Wagens eine elektrische Energie von 39,42 kWh benötigt wird.

Dieser Energiebedarf ist durch die Verwendung von Primärbatterien für die Energieversorgung nicht kompakt zu realisieren und wirtschaftlich zu decken. Es ist ersichtlich, dass die Nutzung der Energiesparmodi unerlässlich ist, oder dass die Energieversorgung durch Verwendung elektrischer Energieerzeuger an jedem ausgerüsteten Wagen in Kombination mit einem Energiespeicher, z.B. Sekundärbatterien, realisiert werden muss.

5.3 Energiebetrachtung für individuelle Fahrprofile

Die Analyse aus Abschnitt 5.2 hat gezeigt, dass die Dauernutzung des Kommunikationssystems während eines Wagen-Revisionszyklus von sechs Jahren mit Primärbatterien nicht zu leisten ist.

Für eine Optimierung des Energiebedarfs und der Energieversorgung kann z.B. ein globales Nutzungsprofil erarbeitet werden, welches jedoch für den Hersteller oftmals einen Kompromiss aus Kosten-Nutzen-Sicht darstellt. Eine differenzierte Analyse der individuellen Nutzungsprofile, abhängig vom Kunden, der beförderten Gutart sowie der Transportentfernung bietet hier Optimierungspotenzial bei der Dimensionierung der Energieversorgung.

Die häufigsten Nutzungsarten bezogen auf die Anteile an der Verkehrsmenge und an der Verkehrsleistung des gesamten Schienengüterverkehrs der *DB Cargo* sind nach [ALLES 1999] der Ganzzugverkehr, der Einzelwagenverkehr sowie der Kombinierte Verkehr (vgl. Tabelle 5.3).

Für diese drei Nutzungsarten wurden folgende Einsatzszenarien mit individuellen Nutzungsprofilen und überschlägig ermitteltem Energiebedarf erarbeitet.

	Anteil an der Verkehrsmenge [%]	Anteil an der Verkehrsleistung [%]	Mittlere Transportweite [km]
Ganzzüge	65,0	53,9	204
Einzelwagenverkehr (ohne Kombiverkehr)	25,1	26,3	257
Kombinierter Verkehr	9,9	19,8	490

Tabelle 5.3: Mittlere Transportentfernungen im Schienengüterverkehr der *DB Cargo* [ALLES 1999]

5.3.1 Szenario 1 - Shuttlezug einer Privatbahn am Beispiel des Germersheim-Shuttles der BASF AG

Bei der *BASF AG* wird ein Shuttle-Zug für den Transport von Containern vom Stammwerk in Ludwigshafen zum CTX-Containerterminal in Germersheim eingesetzt. Die Länge dieses Zuges variiert abhängig von der benötigten Kapazität. In der Regel besteht der Zug aus zwei Führungslokomotiven des Typs V100 in Doppeltraktion, sowie etwa 20 (± 4) Containertragwagen des Typs „SGNS“ mit einer Länge über Puffer von je 19,64 Metern.

Der Betrieb erfolgt in der Regel an fünf Tagen pro Woche, also an 261 Tagen im Jahr. Die Streckenlänge je Richtung beträgt etwa 46 km, welche in 1,5 bis zwei Stunden bewältigt wird. An einem Betriebstag wird diese Strecke einmal im Pendelverkehr absolviert. Die Reisegeschwindigkeit des Zuges ergibt sich rechnerisch zu 23 bis 30 km/h. Aufgrund der Bestrebungen der Wagenvermietgesellschaften zur Minimierung von Standzeiten, ist die maximal zu erwartende Standzeit mit einem Monat ausreichend lang angenommen.

Zur Abschätzung des Wartungsintervalls der Kommunikationseinrichtungen wurden die Häufigkeit und Dauer der planmäßigen und außerplanmäßigen Werkstattaufenthalte ermittelt. Diese Zeit könnte ebenfalls für die Wartung der Kommunikationseinrichtung und ggf. dem Austausch der Energiequellen genutzt werden.

- **Planmäßige Werkstattaufenthalte:** Nach §32 der Eisenbahn Bau- und Betriebsordnung (*EBO*) muss ein Wagen jederzeit bei Bedarf, mindestens jedoch alle sechs Jahre gewartet werden. In einigen Fällen kann diese Vorgabe zwei Mal um jeweils ein Jahr hinausgeschoben werden, d.h. spätestens alle acht Jahre wird jeder Wagen gewartet. Da die Universalwagen des Germersheim-Shuttles gemietet sind, obliegt die Entscheidung der Wartungshäufigkeit dem Wagenvermieter und ist Bestandteil des Mietvertrages.
- **Außerplanmäßige Werkstattaufenthalte:** Die Wagenvermieter Wascosa und KVG gaben auf Nachfrage die außerplanmäßige Ausfallzeit ihrer Kesselwagen mit 1 % des Jahres an. Diese Zahlen sind unmittelbar auf Universalwagen übertragbar. Das heißt, dass an jedem Wagen an durchschnittlich 3,56 Tagen pro Jahr Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten entweder von dem Mieter selbst oder von externen Werkstätten im Auftrag der Wagenvermieter durchgeführt werden.

Damit ergibt sich das in Tabelle 5.4 dargestellte Nutzungsprofil für den Ganzzug einer Privatbahn. Das entsprechende Wochennutzungsprofil ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Dabei entspricht die Balkenbreite der Nutzungszeit.

Größe	Wert
Nutzungshäufigkeit	5 Tage pro Woche
Fahrten pro Jahr	261
Gefahrene Strecke	ca. 46 km ein Weg
Fahrzeit pro Strecke	1,5 bis 2 Stunden
Mittlere Geschwindigkeit	ca. 26 km/h (zwischen 30 und 23 km/h)
maximale Standzeit	ca. 1 Monat (geschätzt)

Tabelle 5.4: Jahresnutzungsprofil für einen Ganzzug einer Privatbahn (Szenario 1)

Anhand der ermittelten Werte wurde nun überschlägig der individuelle, über ein Jahr gemittelte Energiebedarf dieses Szenarios berechnet. Angenommen wurde dabei, analog zu Abschnitt 5.2, eine Leistungsaufnahme von 750 mW im Betrieb während der Fahrt und 0 W im Energiesparmodus während längerer Standphasen geschätzt.

Die Fahrtzeit beträgt $t_{1,Fahrt,Woche} = 3h * 5 = 15$ h pro Woche, bzw. $t_{1,Fahrt,Jahr} = 780$ h pro Jahr.

Die Standzeit beträgt demnach $t_{1,Stand,Jahr} = 8760$ h $- 780$ h = 7980 h pro Jahr.

Aufgrund der Regelmäßigkeit des Zuglaufs kann der in diesem Szenario benötigte Energiebedarf auf 8,9 % der Energiemenge aus Abschnitt 5.2 geschätzt werden. Es resultieren folgende Werte:

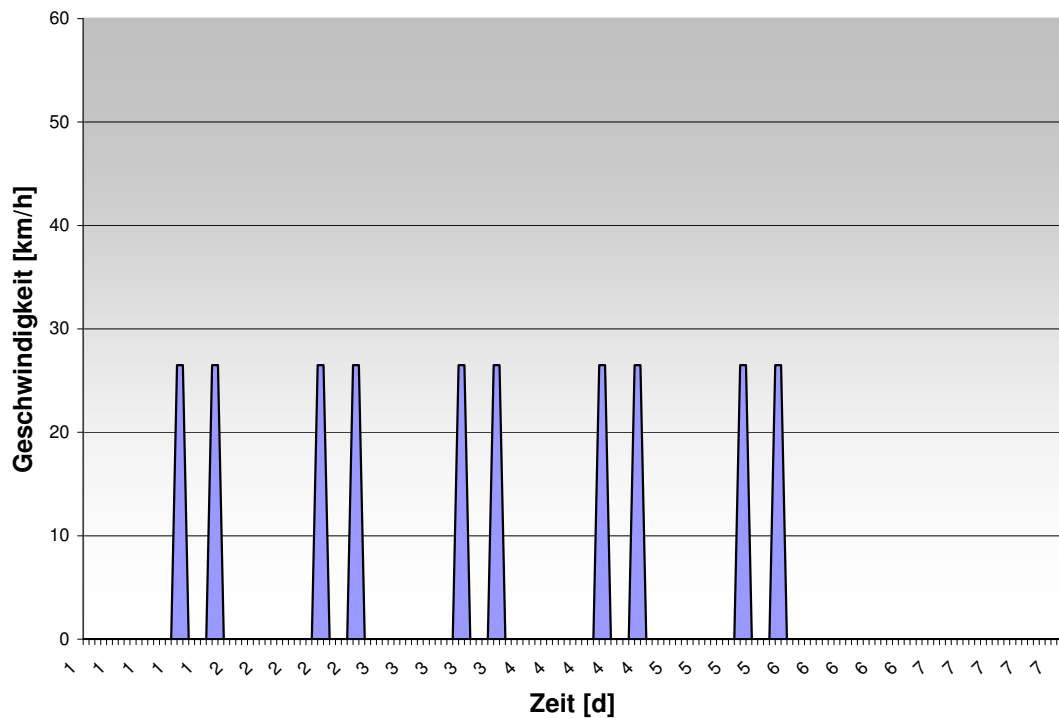


Abbildung 5.1: Wochenfahrprofil eines Ganzzuges für Szenario 1

$W_{1,Jahr} = 584,7 \text{ Wh pro Jahr bzw.}$

$W_{1,Wartungsintervall} = 3,5 \text{ kWh pro 6 Jahre.}$

5.3.2 Szenario 2 - Einzelwagenverkehr auf Werks- und Normalstrecken am Beispiel eines Kesselwagens im Zugriff der BASF AG

Zur Ableitung des Fahrprofils eines Wagens im Einzelwagenverkehr ohne kombinierten Verkehr wurde ein vierachsiger Kesselwagen im Zugriff der *BASF AG* betrachtet. Ein Werksdurchlauf dauert je nach Produkt in der Regel zwischen zwei bis sechs Wochen und wird hier angenommen mit durchschnittlich 30 Tagen. Während dieser Zeit wird ein Kesselwagen gereinigt, zum Beladen bereitgestellt, beladen und schließlich der Zugbildungsanlage zugeführt. Mit dem zusammengestellten Zug wird der Wagen dann zum Kunden transportiert. Die mittlere Transportentfernung beträgt dabei ca. 260 km (vgl. Tabelle 5.3). Unter Umständen werden auf der Reise zum Zielbahnhof noch weitere Reihungen durchgeführt, so dass die sich die Durchschnittsgeschwindigkeit auf ca. 15 km/h verringert. Die Reisedauer ergibt sich rechnerisch zu $\frac{260\text{km}}{15\text{km/h}} = 17,3 \text{ Stunden}$.

Dieser zeitliche Ablauf ist vergleichbar mit dem anderer Privatbahnen, wobei jedoch in der Regel externe Zugbildungsanlagen für die Zugzusammenstellung benutzt werden. Das Monatsfahrprofil ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Die entsprechenden spezifischen

Werte dieses Einsatzszenarios sind in Tabelle 5.5 dargestellt. Das Tagesraster entspricht dabei einer Dauer von 24 Stunden, so dass die Balkenbreite der Nutzungsdauer entspricht.

Größe	Wert
Nutzungshäufigkeit	1 Fahrt pro Monat
Fahrten pro Jahr	12
Gefahrene Strecke	ca. 260 km je Weg
Fahrzeit pro Strecke	17,33 Stunden (unter Annahme der mittleren Reisegeschwindigkeit von 15 km/h)
Mittlere Geschwindigkeit	ca. 15 km/h
maximale Standzeit	im Mittel 1 Monat (Information der BASF AG)

Tabelle 5.5: Jahresbetriebsprofil für einen Kesselwagen im Einzelwagenverkehr (Szenario 2)

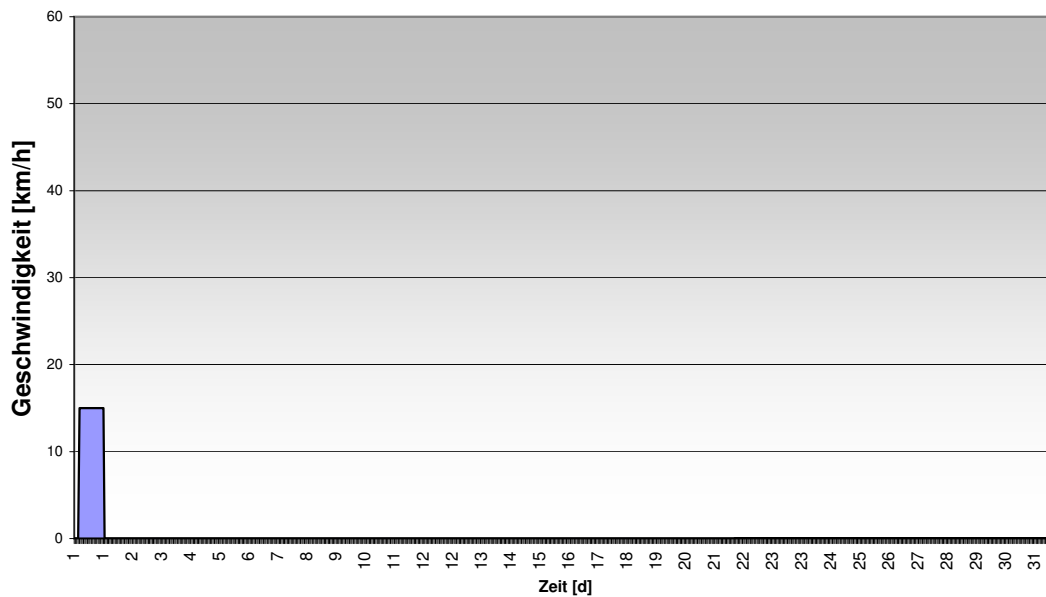


Abbildung 5.2: Monatsfahrprofil eines Kesselwagens für Szenario 2

Anhand der ermittelten Werte wurde nun für dieses Szenario überschlägig der individuelle, über ein Jahr gemittelte Energiebedarf berechnet. Angenommen wurden dabei die gleichen Werte wie in Abschnitt 5.3.1, also $P_{Fahrt} = 750$ mW im Betrieb während der Fahrt und $P_{Stand} = 0$ W im Energiesparmodus während längerer Standphasen.

Die Fahrtzeit beträgt $t_{2,Fahrt,Monat} = 17,33$ h pro Monat, bzw. $t_{2,Fahrt,Jahr} = 207,96$ h pro Jahr.

Die Standzeit beträgt demnach $t_{2,Stand,Jahr} = 8760 \text{ h} - 207,96 \text{ h} = 8552,04 \text{ h}$ pro Jahr.

Aufgrund der Regelmäßigkeit des Zuglaufs kann der in diesem Szenario benötigte Energiebedarf auf 2,37 % der Energiemenge des Dauerbetrieb (vgl. Abschnitt 5.2) geschätzt werden. Es ergeben sich folgende Werte:

$W_{2,Jahr} = 155,7 \text{ Wh}$ pro Jahr und

$W_{2,Wartungsintervall} = 934,3 \text{ Wh}$ pro 6 Jahre.

5.3.3 Szenario 3 - Kombinierte Verkehr am Beispiel der rollenden Landstraße im internationalen europäischen Einsatz

Der Kombinierte Verkehr lebt vor allem vom Alpentransit und ist im Vor- und Nachlauf auf Lastkraftwagen (LKW) angewiesen. Weit weniger als die Hälfte des Transportvolumens des Kombinierten Verkehrs kann als fest zusammengehöriger Zug, also als Ganzzug, direkt zwischen den Umschlagterminals befördert werden.

Als Beispiel für Züge des Kombinierten Verkehrs werden die Züge der „Rollenden Landstraße“ der *Hupach AG* für den grenzüberschreitenden Güterzugverkehr für LKW betrachtet. Bei solchen Zügen werden komplette Lastwagen bzw. Sattelzüge auf spezielle kurzgekoppelte Niederflurwagen, vornehmlich des Typs „Saadmks“ mit 8 Achsen und einer durchgehenden Fahrspur, verladen. Aus den kleinen Raddurchmessern von 360 mm bzw. 335 mm folgen hohe Umdrehungsgeschwindigkeiten der Räder, was wiederum die Drehgestelle wartungsintensiv macht [RÜGER 2005]. Die aufgrund der Wartungsintensität höheren Ausfall- bzw. Wartungszeiten könnten, falls vom Kunden ermöglicht, bei der Dimensionierung der Energiespeicherung berücksichtigt werden.

Entsprechend der Daten aus Tabelle 5.3 beträgt die mittlere Transportreichweite eines Zuges des Kombinierten Verkehrs ca. 490 km. Diese Entfernung wird ungefähr von einem Ganzzug der *Hupach AG* auf der Strecke Ludwigshafen - Busto Arsizio repräsentiert. Laut Fahrplan wird diese Strecke in durchschnittlich 14,8 Stunden bewältigt. Die maximale Standzeit während Wartungs- und Revisionsuntersuchungen wird mit maximal einem Monat angenommen.

Es ergibt sich das in Tabelle 5.6 dargestellte Betriebsprofil für einen Ganzzug des Kombinierten Verkehrs. Das entsprechende Wochenfahrprofil ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Dabei entspricht das Tagesraster einer Dauer von 24 Stunden, so dass die Balkenbreite der Nutzungszeit entspricht.

Größe	Wert
Nutzungshäufigkeit	5 Fahrten pro Woche
Fahrten pro Jahr	261
Gefahrene Strecke	ca. 480 km je Weg
Fahrzeit pro Strecke	ca. 14,8 Stunden (unter Berücksichtigung des Fahrplans)
Mittlere Geschwindigkeit	ca. 32 km/h
maximale Standzeit	ca. 1 Monat

Tabelle 5.6: Jahresbetriebsprofil für einen Wagen im Kombinierten Ganzzugverkehr (Szenario 3)

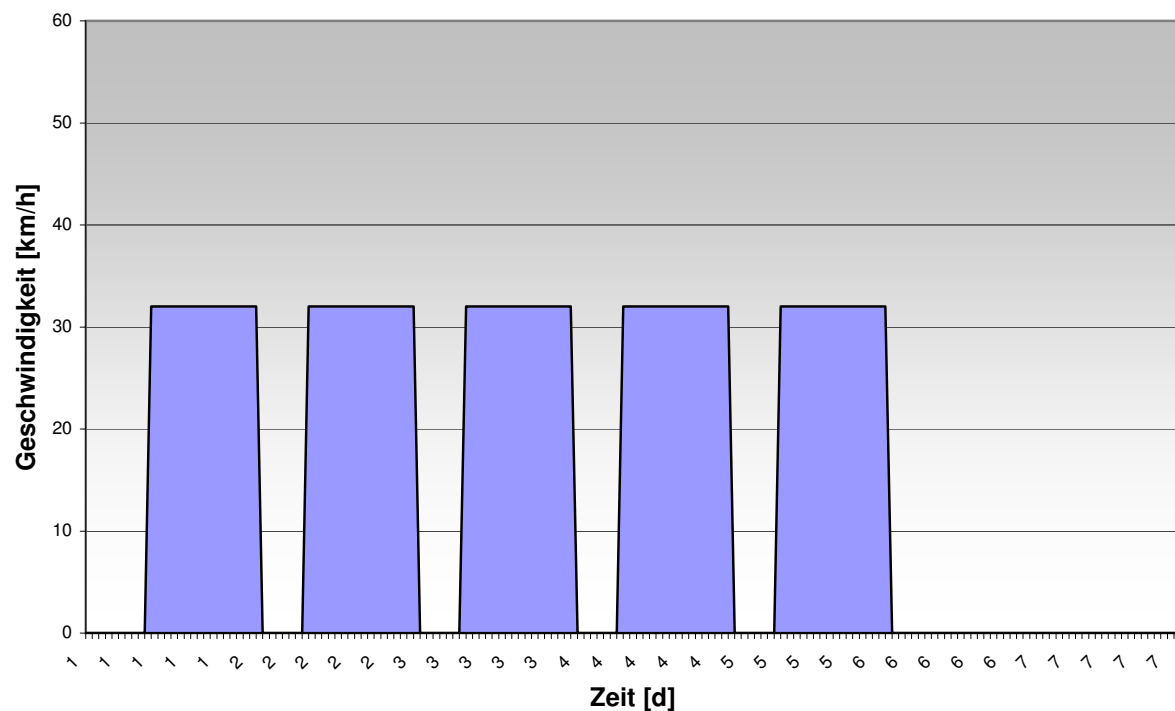


Abbildung 5.3: Wochenfahrprofil eines Wagens des Kombiverkehrs für Szenario 3

Anhand der ermittelten Werte wird nun überschlägig der individuelle, über ein Jahr gemittelte Energiebedarf dieses Szenarios berechnet. Angenommen wird dabei eine Leistungsaufnahme von 750 mW im Betrieb während der Fahrt und 0 W im Energiesparmodus während längerer Standphasen.

Die Fahrtzeit beträgt $t_{3,Fahrt,Woche} = 14,8 \text{ h} \cdot 5 = 74 \text{ h}$ pro Woche, also $t_{3,Fahrt,Jahr} = 3848 \text{ h}$ pro Jahr.

Die Standzeit beträgt demnach $t_{3,Stand,Jahr} = 4912 \text{ h}$ pro Jahr.

Aufgrund der Regelmäßigkeit des Zuglaufs kann der in diesem Szenario benötigte Energiebedarf auf 43,9 % der Energiemenge des Dauerbetrieb (vgl. Abschnitt 5.2) geschätzt werden. Es ergeben sich hier folgende Werte:

$W_{3,Jahr} = 2,89 \text{ kWh}$ pro Jahr und
 $W_{3,Wartungsintervall} = 17,3 \text{ kWh}$ pro 6 Jahre.

5.3.4 Zusammenfassende Bewertung

Zusammenfassend lässt sich die für die Dimensionierung der Energieversorgung relevante Energiemenge für einen Dauerbetrieb der Kommunikationsgeräte auf den Wert von ca. 6,57 kWh pro Jahr, was ca. 39,42 kWh für den Zeitraum von 6 Jahren entspricht, schätzen. Für die Bereitstellung dieser Energiemenge mit Primärbatterien wären hohen Investitionskosten notwendig.

Für die individuellen Nutzungsprofile ergeben sich die Energiebedarfe entsprechend Tabelle 5.7.

In Abschnitt 5.4 werden Einsatzmöglichkeiten von Energiequellen und in Abschnitt 5.5 Möglichkeiten der Energiespeicherung auf Güterwagen betrachtet und bewertet.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Energiebedarf p.a.	$W_{1,Jahr} = 584,7 \text{ Wh}$	$W_{2,Jahr} = 155,7 \text{ Wh}$	$W_{3,Jahr} = 2,89 \text{ kWh}$

Tabelle 5.7: Energiebedarf pro Jahr in Abhängigkeit vom Einsatzszenario

5.4 Möglichkeiten der Energieversorgung auf Güterwagen

5.4.1 Anforderungen an Energiequellen und -erzeuger auf Güterwagen

Die Energiequellen und -erzeuger werden anhand der in Abschnitt 3.3.3 klassifizierten und dekomponierten Anforderungen bewertet. Die definierten Werte der dekomponierten Größen sind in Abbildung 5.4 dargestellt.

Der Einsatz von Energiequellen und -erzeugern ist aus politischen Gründen in hohem Maße von der Kundenpräferenz abhängig (vgl. Abbildung 5.7), denn diese entscheidet über die Einsatzmöglichkeit z.B. eines Achsgenerators oder einer Photovoltaikanlage. Dies geht einher mit den Investitionskosten.

Klassifizierte Anforderung	Wert
Verschmutzungsanfälligkeit	keine bis geringe
Zuverlässigkeit / Spannungs- & Stromfestigkeit / Festigkeit gegen ESD	hohe Zuverlässigkeit
Verfügbarkeit	jederzeit / abh. vom Fahrzustand
Wartungsintervall	6 Jahre oder länger
Betriebssicherheit	keine Gefährdung der Betriebssicherheit
Verschleißanfälligkeit / zeitl. Anforderungen	kein oder geringer Verschleiß
Energiedichte	wurde der Anforderung Kundenpräferenz zugeschlagen
Investitionskosten	wurde der Anforderung Kundenpräferenz zugeschlagen
Wartungskosten	keine
Einsetzbarkeit / Montage / Festigkeit gegen Umweltbedingungen	uneingeschränkt gegeben
Kundenpräferenz	Favorisierung / neutral / Ablehnung

Abbildung 5.4: Übersicht der klassifizierten Anforderungen für Energiequellen und deren Werte

5.4.2 Primärbatterien

Der Begriff Primärbatterie beschreibt die Gesamtheit aller nicht wiederaufladbaren Batterien.

Beim Einsatz von Primärbatterien ist deren Technologie abzuwägen. Entweder werden preiswerte und einfache Batterien (z.B. Alkali-Mangan-Batterien) oder technologisch moderne Batterien (z.B. Lithium-Batterien) mit höheren Investitionskosten verwendet.

Unvorteilhaft ist die natürliche, temperaturabhängige Selbstentladung jeder Batterie, welche umso höher ist, je größer die Umgebungstemperatur ist. Je niedriger die Umgebungstemperatur, desto weniger Energie lässt sich durch Verlangsamung der elektrochemischen Reaktionen in der Batterie aus ihnen entnehmen. Steigende Temperaturen egalalisieren diesen Effekt.

Untersucht wurden Zink-Kohle-Batterien bzw. das Leclanché-Element, Zink-Chlorid-, Alkali-Mangan-, Zink-Luft-, Lithium- und Silberoxid-Batterien.

5.4.3 Achsgeneratoren

Herkömmliche Achsgeneratoren sind bewährte Energieerzeuger zur Speisung der elektrischen Heizung von Personenwagen und zur elektrischen Kühlung von Kühltransport-Güterwagen. Die Einsatzmöglichkeiten wurden an der TU Berlin untersucht [HECHT 1999]. Dabei wurden Radsatzgeneratoren der Firma *Mannesmann-Rexroth AG* vorgeschlagen. Die Firma fusionierte mit der Firma *Bosch* zur *Bosch-Rexroth AG*. Die heutige Liefersituation war nicht zu ermitteln und ist ungeklärt. Daher wurden neuartige, bahntaugliche Radsatzgeneratoren vorgeschlagen, welche in Kooperation der Firmen *FAG OEM und Handels AG* und *SAB WABCO KP GmbH* speziell für den Güterwagenbereich entwickelt und auf der Messe *InnoTrans 2001* vorgestellt wurden. Zwei Leistungsklassen, mit 5 Watt und mit 100 Watt, werden angeboten.

Aufgrund der zertifizierten Bahntauglichkeit werden sämtliche Anforderungen von diesen Generatoren erfüllt, so dass deren Einsatz möglich und in Kombination mit einem Energiespeicher sinnvoll ist.

5.4.4 Feder-Masse-Schwinger

Als Möglichkeit für künftige Entwicklungen schlägt [HECHT 1999] den Einsatz eines nach dem Feder-Masse-Schwinger-Prinzip arbeitenden Energiewandlers vor, der aus den auftretenden Vertikalkräften / -schwingungen durch Umwandlung von translatorischer Energie in rotatorische Energie elektrische Energie erzeugt. Da der Energiewandler selbst eine vermutlich sehr geringe Energiedichte haben würde, räumten die Wissenschaftler ein, dass in Bereichen guten Oberbaus, was die Bestrebungen beim Neubau bzw. der Modernisierung von Bahnstrecken sind, sehr wenig Energie gewonnen werden kann. Während des Stillstandes kann keine Energie erzeugt werden.

Derartige Energiewandler wurden bisher für den Eisenbahnbetrieb nicht realisiert und werden es nach persönlicher Einschätzung aufgrund der oben genannten Gründe wahrscheinlich auch nicht.

5.4.5 Feder-Magnet-Schwinger

Gegenstand des Patents [TIEMANN und JOHNSON 1995] ist eine Einrichtung zur Erzeugung elektrischer Energie nach dem Induktionsprinzip. In einem Gehäuse sei eine Magnetträgerstruktur mit Hilfe von Federn so angeordnet, dass sie entlang der Schwingungsachse in einen zweiten Magnetsatz eintauche. Es würde eine magnetische Flussänderung hervorgerufen, aus der dann elektrische Energie erzeugt würde. Derartige Generatoren hätten ebenfalls eine geringe Energiedichte.

Die Marktverfügbarkeitsanalyse verlief negativ.

5.4.6 Seismischer Schwingmassengenerator

Gegenstand der Patente [TALKE 2003a] und [TALKE 2003b] ist ein seismischer Generator zur Erzeugung elektrischer Energie. Bei diesem System wird erfindungsgemäß eine seismische Masse zwischen mindestens zwei Piezokörpern eingespannt. Durch Vibrationsbewegungen während der Fahrt werden an den Seitenflächen des Piezokörpers Ladungen erzeugt, welche mit Hilfe einer Schaltung als elektrische Energie zur Verfügung gestellt werden. Um Trägheitskräfte in allen drei Raumachsen auszunutzen, wird die Einspannung der seismischen Masse in allen drei Raumrichtungen vorgeschlagen. Derartige Generatoren erzeugen zudem während der Fahrt voraussichtlich nur geringe Mengen an Energie bzw. müssten unverhältnismäßig groß sein.

Eine marktreife Umsetzung dieses Patents existiert bislang nicht.

5.4.7 Luftdruckgenerator

Aus [HECHT 1999] geht hervor, dass Druckluftgeneratoren im Bereich der Eisenbahntechnik verbreitet sind. Dabei wird ein Teil der durch den Zug geführten Druckluft des Bremssystems zur Erzeugung elektrischer Energie verwendet. Die maximal zulässigen Druckverluste dürfen unter keinen Umständen überschritten werden. Diese Art der Energiegewinnung ist nur bei angekuppelter Lokomotive und korrekt verbundener Druckluftleitungen im gesamten Fahrverband möglich. Sollte die Druckluftleitung ihrerseits ein Leck besitzen, so kann dies beim gleichzeitigen Betrieb der Druckluftgeneratoren zum Ausfall des Bremssystems führen. Dies bedeutet für das System Bahn wegen des sicheren Fehlerverhaltens („fail safe“) einen Stillstand des Fahrverbands.

Grundsätzlich bedeutet der Einsatz von Druckluftgeneratoren einen Eingriff in ein bahntechnisch sicherheitsrelevantes System. Trotz der angedeuteten weiten Verbreitung erbrachte eine Internet-Recherche nach Herstellern keine Ergebnisse.

5.4.8 Flügelwindräder

Herkömmliche Flügelwindräder basieren auf dem Prinzip der Radialachsengeneratoren und besitzen den Nachteil der notwendigen Windnachführung. Für die Energiegewinnung durch den Einsatz von Flügelwindrädern auf einem Güterwagen wird primär der Fahrtwind genutzt. In diesem Fall kann ein Flügelwindrad fix in Fahrtrichtung montiert werden, so dass die Windnachführung entfallen kann. Da ein Wagen jedoch sowohl vor- als auch rückwärts fahren kann, wäre ggf. für jede Fahrtrichtung ein Flügelwindrad anzubringen bzw. das eine Windrad muss bidirektional funktionieren und so montiert sein, so dass der Fahrtwind in jedem Fall ausgenutzt werden könnte.

Weiterhin besitzt ein Flügelwindrad ein schlechtes Anlaufverhalten für niedrige Windgeschwindigkeiten, wohingegen es bei zu schneller Anströmung zum Abriss (Stall) kommt. Problematisch ist der extreme Windgeschwindigkeitsbereich an einem Güterzug. Es treten Windgeschwindigkeiten von 0 m/s bis zu 33 m/s (120 km/h) auf. Kommerzielle Flügelwindräder in Windfarmen werden bei Windgeschwindigkeiten ab etwa 22 m/s abgeschaltet, was entweder durch Blattverstellung oder Generatorkurzschluss geschieht [SUPERWIND GMBH 2004]. Die an einem Güterzug während der Fahrt erreichbaren Windgeschwindigkeiten liegen über dieser Abschaltwindgeschwindigkeit. Somit sind solche Flügelwindräder für den Einsatz zur dauerhaften Stromerzeugung auf Güterzügen nur eingeschränkt geeignet.

Vorteil von drehbar gelagerten Windrädern ist, dass auch während der Standzeiten eine gewisse Menge an Energie erzeugt wird (z.B. zum Ausgleich der Selbstentladung eines einzusetzenden Akkumulators).

Der Nachteil von Flügelwindrädern liegt in dem Risiko der Beschädigung und des Verschleißes durch Einsatz der mechanisch beweglicher Teile in dem anspruchsvollen Einsatzgebiet des Schienengüterverkehrs. Deshalb wurde ein Einsatz bis heute nicht realisiert. Darüber hinaus konnte kein geschützter und unabhängig vom Wagentyp geeigneter Anbauort an einem Güterwagen ohne Verletzung des Lichtraumprofils identifiziert werden.

5.4.9 Savoniusrotoren

Savoniusrotoren basieren auf dem Prinzip der Axialgeneratoren. Horizontal gelagerte Savoniusrotoren sind gerade abhängig von der Anströmrichtung des Windes und können sich, anders als Flügelwindräder, nicht zum Wind drehen um die volle Leistungsfähigkeit zu erreichen.

Denkbar wäre der Einsatz eines horizontalen Savoniusrotors mit einer Länge von etwa einem Meter an einem Anbauort unter dem Wagen. Nachteil dieser Lösung wäre der Einsatz mechanisch beweglicher Teile im steinschlaggefährdeten Bereich unterhalb des

Wagens.

Savoniusrotoren zählen zu den Langsamläufnern, besitzen aber ein relativ großes Drehmoment.

5.4.10 Solarzellen

Die Energiegewinnung auf Güterwagen ist durch den Einsatz von Photovoltaikanlagen, also Solarzellen, grundsätzlich denkbar und wird schon kommerziell eingesetzt (Ortungssystem *ATIS* - vgl. Abschnitt 4.2.1). Da das Lastprofil eines elektrischen Verbrauchers im Allgemeinen nicht mit dem Leistungsprofil eines photovoltaischen Solargenerators korreliert, ist insbesondere auch für die Nutzung der Energie während der Nacht und längerer Standzeiten ein Energiespeicher vorzusehen. Als Standard-Energiespeicher in Photovoltaikanlagen haben sich Bleiakkumulatoren durchgesetzt. In Ausnahmefällen, z.B. für Anwendungen in polaren Regionen, werden aufgrund der besseren Frostbeständigkeit NiCd-Akkumulatoren verwendet [WAGNER 1999].

Die zu entnehmende Energiemenge ist abhängig von der Intensität der Einstrahlung, welche wiederum abhängig vom Wetter, vom Standort, von der Jahreszeit und vom Grad der zeitlinear zunehmenden Verschmutzung ist. Die gesamte eingestrahlte Energie über einen bestimmten Zeitraum wird als Einstrahlung bezeichnet und ist damit ein Maß für die Stärke des Sonnenlichts. Die Einstrahlung wird in W/m^2 , die Energieausbeute pro Fläche, also die Energiedichte, in Wh/m^2 pro Tag angegeben. Eine Stunde Normbestrahlung entspricht dabei einer Energiedichte von $1 \text{ kWh}/\text{m}^2$. Dies entspricht ungefähr der Energie, die an einem wolkenlosen Tag im Sommer innerhalb einer Stunde auf eine senkrecht zur Sonne stehenden Fläche von einem Quadratmeter trifft.

Es wird zwischen den am preiswertesten amorphen Siliziummodulen, den etwas besseren und daher teureren polykristallinen Modulen und den derzeit besten monokristallinen Siliziummodulen unterschieden. Angeboten werden hauptsächlich Module aus amorphen Silizium (*RWE SCHOTT Solar GmbH* ASI-Module).

Bei bewölktem Himmel sinkt die entnehmbare Leistung bei Modulen aus amorphen Silizium laut Datenblatt der EFG-Solarzellen um den Faktor 100 von $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ bei ca. $32 \text{ mA}/\text{cm}^2$ auf etwa $10 \text{ W}/\text{m}^2$ bei $3 \text{ mA}/\text{cm}^2$ ab [SOLAR 2006].

Material	Labor-Wirkungsgrad [%]	Produktiv-Wirkungsgrad [%]
monokristallines Si	bis 24	14 bis 17
polykristallines Si	bis 18	13 bis 15
amorphes Si	bis 13	5 bis 7

Tabelle 5.8: Mittlerer Wirkungsgrad von Solarzellen je Typ [SOLARSERVER 2005]

Zellen aus amorphem Silizium z.B. von *RWE SCHOTT Solar GmbH* verlieren in den ersten 100 Betriebsstunden etwa 30 bis 40 % ihres Wirkungsgrades (Zellstabilisierungsphase). Danach nimmt der Wirkungsgrad unter normalen Umweltbedingungen mit jahreszeitlichen Schwankungen nur noch geringfügig ab.

Solarzellen sind empfindlich gegenüber Verschmutzung. Der Anbauort am Wagen ist möglichst so zu wählen, dass Regenwasser einfach abfließen kann und so vorhandene Verschmutzungen herunter gewaschen werden. Die Auswertung einer Verfügbarkeitsstudie „Reliability Study of Grid Connected PV Systems“ ergab, dass der Einfluss der Verschmutzung in Europa nicht so hoch einzustufen ist wie in Wüstenregionen z.B. in Dakar, Senegal. Hartnäckige Verschmutzungen, wie z.B. Vogelkot, Moos und Schmutzablagerungen an den Rändern eines Solarmoduls werden bei regelmäßigen Niederschlägen nicht oder nicht komplett herunter gewaschen [LAUKAMP 2002].

In [WAGNER 1999] wurde der Einfluss von Staub und Verschmutzung auf die relative Ausbeute der Solarzelle anhand einer Langzeitstudie in Dakar, Senegal in den Jahren 1989 und 1990 erläutert. Untersucht und ausgewertet wurden vier unterschiedliche Reinigungsstrategien:

- Bei täglicher Reinigung kann eine konstante relative Ausbeute von 100 % angenommen werden.
- Bei wöchentlicher Reinigung schwankt die relative Ausbeute zwischen 100 % und 90 %.
- Bei monatlicher Reinigung schwankt die relative Ausbeute zwischen 100 % und 70 %.
- Bei Wegfall jeder Reinigung sinkt die relative Ausbeute innerhalb 170 Tagen auf unter 20 % ab.
- Ab Beginn der Regenzeit schwankt die relative Ausbeute bei allen Reinigungsstrategien zwischen 100 % und 95 %.

Für einen Einsatz in Europa ist mit geringerer Verstaubung sowie mit regelmäßigen Niederschlägen zu rechnen, so dass der Einfluss von Staub als gering zu bewerten ist. In [KARL 1984] wird berichtet, dass ein Solargenerator am Standort Stuttgart nach 6 Monaten ohne Reinigung noch eine relative Ausbeute von 90 % besaß. Nach zwei Jahren ohne Reinigung wurden 86 % relative Energieausbeute gemessen.

In [WAGNER 1999] wird trotzdem auch für den Betrieb in Mitteleuropa mindestens eine jährliche Reinigung der Solargeneratoren empfohlen, was in einem Betriebs- und Wartungskonzept des Kommunikationssystems berücksichtigt werden sollte. Der Einfluss von Bahnstaub wurde aufgrund fehlender Daten nicht abgeschätzt.

Die funktionale Verfügbarkeit von Photovoltaikanlagen wurde anhand den Ergebnissen der Studie [LAUKAMP 2002] abgeschätzt, welche das deutsche „1000-Dächer-Programm“, das japanische „Subsidy Program for Residential PV“, das österreichische „Upper Austria“ und das deutsche „Sonne in der Schule“-Programm berücksichtigt. Dabei wurden drei Hauptausfallursachen nach Häufigkeit identifiziert. Die Studie macht die Notwendigkeit der sorgfältigen Komponentenauswahl deutlich.

1. Ausfall des Inverters in 66 % aller erfassten Fehlerfälle

Die Ausfallrate sank kontinuierlich von 27 % in 1993 auf 10 % in 1997, was mit einer Qualitätsverbesserung der Komponenten begründet werden kann. Auch in Japan sank diese Rate von 15 % in 1996 auf etwa 10 % in 1998.

2. Defekt des Photovoltaikgenerators

Die Ausfallrate lag beim deutschen „1000 Dächer-Programm“ bei 5 % im Jahre 1993, sank jedoch auf 3 % in 1995. Diese Rate galt bis zum Abschluss der Datenerfassung im Jahre 1997. In Japan lag die Ausfallrate kontinuierlich bei etwa 1 % in den Jahren 1996, 1997 und 1998.

3. Andere Defekte

Andere Defekte sind z.B. sonstige Hardwarefehler.

5.4.11 Brennstoffzellen

Bei der Entwicklung von Brennstoffzellen sind in den vergangenen Jahren große Fortschritte erzielt worden. Beispiele dafür sind die Forschungen verschiedener Automobilhersteller bei der Entwicklung eines Wasserstoffantriebes. Im Vergleich zu herkömmlichen Akkumulatoren und Batterien besitzen Brennstoffzellen eine drei bis fünf Mal längere Laufzeit. Sie lassen sich schneller aufladen, besitzen eine größere Anzahl von „Ladezyklen“ durch Nachtanken, ein geringeres Gewicht und eine wesentlich längere Lebensdauer. Es existieren zwei grundsätzlich unterschiedliche Typen von Brennstoffzellen. Zum einen die mit Wasserstoff gespeisten und zum anderen mit Methanol gespeisten Zellen.

Brennstoffzellen sind kompakt und leistungsfähig, sind jedoch für den Einsatz auf Güterwagen aus Sicherheitsgründen nicht zulässig. Eine Betankung mit Methanol ist aus Sicherheitsgründen untersagt.

5.4.12 Zusammenfassung und Bewertung der Energiequellen und -erzeuger

Mit Hilfe der Methode des *Paarweisen Vergleichs* (vgl. Abschnitt 2.3) wurden die Energiequellen und -erzeuger anhand der dekomponierten Anforderungen entsprechend Abschnitt 3.3.3 bewertet. Das Kriterium „Einsetzbarkeit“ unter den Umweltaforderungen

fasst die Anforderungen bezüglich der Resistenz gegen Strahlung, gegen chemische und biologische Einflüsse und Dichtigkeit gegen Feuchtigkeit, Gasen und Feststoffen zusammen.

Die gewichtete Bewertung der Energieerzeuger erfolgt durch die Punkteverteilung entsprechend Tabelle 5.9. Eine Ausnahme machen die Kriterien Kundenpräferenz und Marktverfügbarkeit. Für die Kundenpräferenz drückt der Wert „-1“ Ablehnung, der Wert „0“ Neutralität und der Wert „+1“ Zustimmung aus. Die Marktverfügbarkeit ist entweder negativ „0“ oder positiv „1“, wobei „0“ ein Ausschluss-Kriterium darstellt.

Die gewichtete Bewertungsmatrix ist in Abbildung 5.8 dargestellt.

Bewertungspunktzahl	Bedeutung
0	erfüllt die Anforderungen nicht
1	erfüllt die Anforderungen mit Einschränkungen
2	erfüllt die Anforderungen

Tabelle 5.9: Bedeutung der Bewertungspunktzahlen für die gewichtete Bewertung

In der gewichteten Bewertung der Energiequellen und -erzeuger wurden Lithium-Primärbatterien vor Photovoltaikanlagen, gefolgt von Prototypen der neuartigen Achsgeneratoren der Firma *FAG* auf dem 3. Rang als am geeignetsten bewertet. Der Nachteil der Achsgeneratoren und Photovoltaikanlagen besteht in der Notwendigkeit der Kombination mit einem Energiespeicher.

Bei einer entsprechend stromsparenden Hardware der Kommunikationseinheiten eignen sich entsprechend dimensionierte Primärbatterien mit einer hohen Zellenspannung und einer geringen Selbstentladungsrate, wie z.B. Lithium-Primärbatterien.

Kategorie Kriterium		Ledaché-Elemente = Zink-Kohle	Zink-Chlorid	Alkaline-Zellen (Zink-Mengandioxid)	Zink-Luft-Zellen	Lithium-Zellen	Silberoxid-Zellen (AgO)	DM-Brennstoffzellen von SmartFuel/Ce
technisch	Spannung	1,5 V	1,5 V	1,5 V	1,4 V	3 - 4 V / typ. 3,6 V	1,55 V	herstellereabhängig
	Selbstentladungsrate	10 % / Jahr bzw. 20 % / 2,4 Jahren bei 20 °C	10 % / Jahr bzw. 20 % / 2,4 Jahren bei 20 °C	4 % / Monat Panasonic: 7 % / Jahr	nicht bekannt	1 % / Monat	nicht bekannt	nicht bewertbar
	Verschmutzungsanfälligkeit	unempfindlich bei geschützten Elektroden	unempfindlich bei geschützten Elektroden	unempfindlich bei geschützten Elektroden	unempfindlich bei geschützten Elektroden	unempfindlich bei geschützten Elektroden	unempfindlich bei geschützten Elektroden	unempfindlich
	Zuverlässigkeit (RAMS)	zuverlässig	zuverlässig	zuverlässig	zuverlässig	zuverlässig	zuverlässig	gut
	Verfügbarkeit (RAMS)	jederzeit verfügbar	jederzeit verfügbar	jederzeit verfügbar	jederzeit verfügbar	jederzeit verfügbar	jederzeit verfügbar	nicht bekannt
	Duty Cycle / Lebensdauer	nicht bekannt	nicht bekannt	2 Jahre Duty, 1 Jahr Lagerung	3 Jahre Duty, 2 Jahre Lagerung	10 Jahre	nicht bekannt	nicht bekannt
	Energiedichte	1 - 1,5 Wh/in ²	2 - 2,5 Wh/in ²	260 Wh/kg	140 Wh/kg	500 Wh/kg	nicht bekannt	sehr gut (400 - 3000 Wh/kg)
technisch u. betrieblich	Einsetzbarkeit	kein Anbieter bekannt	kein Anbieter bekannt	möglich	Temperaturbereich ist nicht ausreichend	Sicherheitsvor- schriften müssen beachtet werden	Temperaturbereich ist nicht ausreichend	Temperaturbereich, Alterung und Betankung müssen gelöst werden
	Wartungsintervall / -aufwand Maintainability (RAMS)	wartungsfrei	wartungsfrei	wartungsfrei	nicht bekannt	wartungsfrei	nicht bekannt	keine Wartung erforderlich
betrieblich	Verschleißanfällig	kein Verschleiß	kein Verschleiß	kein Verschleiß	kein Verschleiß	kein Verschleiß	kein Verschleiß	Leistungsverlust von 28 % in den ersten 300 h (k. A. über Langzeitverhalten)
	Betriebssicherheit (RAMS)	keine Beeinträchtigung der Betriebs- sicherheit des Bahnbetriebs	keine Beeinträchtigung der Betriebs- sicherheit des Bahnbetriebs	keine Beeinträchtigung der Betriebs- sicherheit des Bahnbetriebs	unbedingt stehende Lagerung	bei unbeschä- digtem Zustand ist bahntechnische Sicherheit gewährleistet	nicht bekannt	unbedenklich unter Beachtung von Sicherheitsrichtlinien
	Temperaturbereich	n. b. / -20 bis +55 °C ??	n. b. / -20 bis +55 °C ??	-20 bis +55 °C	-5 bis +45 °C	-40 bis +70 °C (Panasonic) -60 bis +85 °C (SAFT)	0 bis +50 °C	-20 bis +40 °C, unter best. Voraussetzungen auch T1
	Umweltverträglichkeit	Entsorgung notwendig	Entsorgung notwendig	Entsorgung notwendig	Entsorgung notwendig	Entsorgung notwendig	Entsorgung notwendig	sehr gut
	Anschaffungspreis	günstig	etwas teurer als ZIC	etwas teurer als ZICI	nicht bekannt	nicht bekannt	nicht bekannt	noch vergleichsweise teuer
	Betriebskosten	keine Betriebskosten	keine Betriebskosten	keine Betriebskosten	keine Betriebskosten	keine Betriebskosten	keine Betriebskosten	Regelmäßige Betankung abh. vom Tankvolumen
Verfügbarkeit am Markt		kein Anbieter bekannt	kein Anbieter bekannt	Panasonic u.v.w.	SAFT	Panasonic, SAFT	nicht bekannt	SmartFuelCell (Testzwecke)

Abbildung 5.5: Eigenschaftenmatrix der Energiequellen und -erzeuger (Teil 1)

Kategorie	Kriterium	Herkömmliche Achsgeneratoren	Neuartige Achsgeneratoren (FAG)	Feder-Masse-Schwinger	Feder-Magnet-Schwinger (Patent von Talke)	seismischer Schwingmassengenerator (Patent von Talke)	Bremsschiffelgenerator	Flügelwindrad	Savoniusrotor	Photovoltaik (Solarzelle)
technisch	Spannung		6, 12 oder 24 V							herstellereabhängig
	Selbstentladungsrate	nicht bewertbar	nicht bewertbar	nicht bewertbar	nicht bewertbar	nicht bewertbar	nicht bewertbar	nicht bewertbar	nicht bewertbar	nicht bewertbar
	Verschmutzungsanfälligkeit	unempfindlich	unempfindlich	ein solcher Generator wäre unempfindlich gegen Verschmutzung	ein solcher Generator wäre unempfindlich gegen Verschmutzung	ein solcher Generator wäre unempfindlich gegen Verschmutzung	nicht bekannt	regelmäßige Reinigung empfohlen	unempfindlich	unempfindlich, aber abh. vom Anbauort!
	Zuverlässigkeit (RAMS)	nicht bekannt	nicht bekannt, da Vorserienmuster	nicht bewertbar	nicht bewertbar	nicht bewertbar	nicht bekannt	Anlaufprobleme bei niedrigen Windgeschwindigkeiten	gut	gut
	Verfügbarkeit (RAMS)	nicht bekannt	nicht bekannt, da Vorserienmuster	nicht bewertbar	nicht bewertbar	nicht bewertbar	nicht bekannt	nicht bekannt, Offshore: 98 %	nicht bekannt	jederzeit verfügbar, wenn nicht beschädigt
	Duty Cycle / Lebensdauer	nicht bekannt	gut jedoch keine genaueren Angaben möglich, da Vorserienmodell	nicht bewertbar	nicht bewertbar	nicht bewertbar	nicht bekannt	nicht bekannt	nicht bekannt	10 bis 25 Jahre und mehr
	Energiedichte	nicht bewertbar	nicht bewertbar	gering	gering	sehr gering, d.h. Generator müsste sehr groß sein	nicht bewertbar	gut	nicht bekannt	160 W/m²
technisch u. betrieblich	Einsetzbarkeit	kein Anbieter bekannt	universell für jeden Wagentyp, zwei Typen mit 5W oder 100W	nicht einmal Prototyp	nicht einmal Prototyp	nicht einmal Prototyp	Eingriff in sicherheitsrelevantes System	kein geeigneter Anbauort	kein Anbieter von Savoniusrotoren in dieser Größe bekannt	abhängig vom Wagentyp, sinnvoll auf Kesselwagen, andere Wagen sind abzuwägen
	Wartungsintervall / -aufwand Maintainability (RAMS)	nicht bekannt	nicht bekannt, da Vorserienmuster	ein solcher Generator wäre aufgrund des Aufbaus wartungsfrei	ein solcher Generator wäre aufgrund des Aufbaus wartungsfrei	ein solcher Generator wäre aufgrund des Aufbaus wartungsfrei	nicht bekannt	wartungsfrei, Hersteller von Yacht Windrädern empfehlen regelmäßige jährliche Kontrolle	vermutlich wartungsfrei	keiner oder gering, evtl. Reinigungen erforderlich, auch abh. von der Leistungsfähigkeit der Solarzelle (je überdimensionierter, desto länger die Wartungsintervalle)
betriebl.	Verschleißanfälligkeit	angenommen	sehr gering	sehr gering	sehr gering	sehr gering	nicht bekannt	gering	nicht bekannt	ohne Beschädigung sehr gering
	Betriebssicherheit (RAMS)	unbedenklich	unbedenklich	unbedenklich	unbedenklich	unbedenklich	bedenklich, Eingriff in sicherheitsrelevantes System	unbedenklich	unbedenklich	unbedenklich
	Temperaturbereich	ausreichend (Lastenheft)	-40 bis +85 °C	vermutlich ausreichend (Lastenheft)	vermutlich ausreichend (Lastenheft)	vermutlich ausreichend (Lastenheft)	ausreichend (Vereisung?)	ausreichend in T1 (-25 bis +40 °C)	ausreichend bei entspr. Konstruktion	-40 bis +80 °C
	Umweltverträglichkeit	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut
	Anschaffungspreis	nicht bekannt	noch keine Angabe, da Vorserienmodell	nicht bewertbar	nicht bewertbar	nicht bewertbar	nicht bekannt	nicht bekannt	nicht bekannt	nicht bekannt
	Betriebskosten	laut Vorgabe des Herstellers	laut Vorgabe des Herstellers	nicht bewertbar	nicht bewertbar	nicht bewertbar	nicht bekannt	durch empfohlene jährliche Kontrollen (Sichtprüfung, Säubern, Kontrolle der mech. & el. Verbindungen)	vermutlich keine, da wartungsfrei	vermutlich keine oder nur geringe, da wartungsfrei
betriebl.	Verfügbarkeit am Markt	kein Anbieter bekannt	Firma FAG	kein Anbieter bekannt	kein Anbieter bekannt	kein Anbieter bekannt	kein Anbieter bekannt	z. B. Rutland 503	kein Anbieter bekannt	mehrere Anbieter, z.B. RWE Schott Solar

Abbildung 5.6: Eigenschaftenmatrix der Energiequellen und -erzeuger (Teil 2)

		geografisch	klimatisch	mechanisch	EMV	Einsetzbarkeit	Lebens- / Nutzungsdauer	Verschmutzungsanfälligkeit	RAMS(S)	Verschleißanfälligkeit	Energiedichte	Investitionskosten	Wartungskosten	Kundenpräferenz	Verfügbarkeit am Markt	Zeilensumme	GEWICHT [%]	Rang
Umweltanforderungen	geografisch	2	0	0	0	0	0	1	0	2	2	0	1	0	0	6	3,30	10
	klimatisch	2	2	1	1	2	1	2	0	2	2	2	2	2	0	20	10,99	3
	mechanisch	2	0	2	1	1	1	2	0	2	2	1	1	1	0	14	7,69	6
	EMV	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	0	15	8,24	5
	Einsetzbarkeit	2	0	1	1	2	1	1	2	2	2	2	2	1	0	17	9,34	4
Zeitliche Anforderungen	Lebens- / Nutzungsdauer	2	1	1	1	0	2	0	1	2	2	2	2	1	0	15	8,24	5
energetische Anforderungen	Verschmutzungsanfälligkeit	1	0	0	0	1	0	2	1	1	2	0	1	0	0	7	3,85	9
	RAMS(S)	2	2	2	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	0	21	11,54	2
	Verschleißanfälligkeit	0	0	0	1	0	1	1	0	2	2	1	1	1	0	9	4,95	8
	Energiedichte	0	0	0	1	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	2	1,10	11
	Investitionskosten	2	0	1	1	0	0	2	0	0	1	1	1	1	0	9	4,95	8
	Wartungskosten	1	0	1	1	0	0	1	0	1	2	1	1	1	0	9	4,95	8
	Kundenpräferenz	2	0	1	0	1	1	2	0	1	2	1	1	2	0	12	6,59	7
	Verfügbarkeit am Markt	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	26	14,29	1
		unwichtiger 0 gleichwichtig 1 wichtiger 2																

Abbildung 5.7: Priorisierung der Anforderungen für die Energiequellen und -erzeuger nach der Methode des „Paarweisen Vergleichs“

		Priorität [%]	Ledantché-Elemente = Zink-Kohle	Zink-Chlorid	Alkaline-Zellen	Zink-Luft-Zellen	Lithium-Zellen	Silberoxid-Zellen (AgO)	DM-Brennstoffzellen von SmartFuelCell	PEM-Brennstoffzellen	Herkömmliche Achsgeneratoren	Neuartige Achsgeneratoren (FAG)	Feder-Masse-Schwinger	Feder-Magnet-Schwinger	seismischer Schwingungsmassegenerator	Brenndruckluftgenerator	Flügelwindrad	Savoniusrotor	Photovoltaik (Solarzelle)
Umweltanforderungen	geografisch	3,30	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	klimatisch	10,99	0	0	1	0	2	0	2	2	2	2	2	2	2	0	2	2	2
	mechanisch	7,69	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0	0	2
	EMV	8,24	2	2	2	2	2	2	0	0	2	2	0	0	0	2	2	2	2
	Einsetzbarkeit	9,34	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Zeitliche Anforderungen	Lebens- / Nutzungsdauer	8,24	0	0	1	1	2	1	1	1	2	2	0	0	0	0	1	1	2
energetische Anforderungen	Verschmutzungsanfälligkeit	3,85	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
	RAMS(S)	11,54	2	2	2	1	2	1	1	1	2	2	0	0	0	0	1	1	2
	Verschleißanfälligkeit	4,95	2	2	2	2	2	2	0	0	2	2	2	2	2	0	2	0	2
	Energiedichte	1,10	2	2	2	2	2	0	2	2	0	0	0	0	0	0	2	0	2
	Investitionskosten	4,95	2	2	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Wartungskosten	4,95	2	2	2	2	2	2	0	0	2	2	0	0	0	0	1	0	2
	Kundenpräferenz	6,59	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	0	0	1
	Verfügbarkeit am Markt	14,29	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1
Gewichtungspunktzahl			0	0	132	105	160	103	92	0	0	151	0	0	0	0	113	0	156
gewichteter Rangplatz					4.	6.	1.	7.	8.			3.					5.		2.

Eine Ablehnung des Kunden wird in der Bewertung mit "-1" bewertet.
Die fehlende Marktverfügbarkeit ist ein Ausschlusskriterium!

Abbildung 5.8: Gewichtete Bewertung der Energiequellen und Energieerzeuger

5.5 Möglichkeiten der Energiespeicherung

Für die Speicherung von elektrischer Energie auf Güterwagen eignen sich primär Sekundärbatterien, also Akkumulatoren, jedoch kommen auch Kondensatoren mit einer sehr großen Kapazität bis 2,5 F je Kondensator in Betracht, welche unter dem Markennamen *SuperCap* von der koreanischen Firma *nuinTEK* angeboten werden. Sekundärbatterien weisen zum Teil stark variierende Eigenschaften in Abhängigkeit von den Umgebungs- und Betriebsbedingungen auf.

Als Einflussgrößen sind zu nennen und ggf. bei einem Einsatz zu berücksichtigen: Überladung, Elektrolytveränderung, Alterung, Korrosion, Selbstentladung, Temperatur (Hitze und Kälte), Druck, Vibration, Schock, Strahlung, Beschädigung (Deformation, Risse, Leck), Gasung und Fehlbehandlung durch Tiefentladung, Verpolung, Kurzschluss, Wechselstrom, Grenzstrom oder Überlastung.

Die Selbstentladung von Sekundärbatterien ist temperaturabhängig und umso größer, je höher die Umgebungstemperatur ist. Hingegen verlaufen die elektrochemischen Reaktionen umso langsamer, je niedriger die Umgebungstemperatur ist, d.h. desto weniger Energie lässt sich aus den Batterien entnehmen. Dieser Effekt ist reversibel. Bei der Dimensionierung der Energiespeicher stellt die Selbstentladungsrate bei Annahme einer entsprechend häufigen und langen Nachladung kein Problem dar (vgl. Abschnitt 5.6.2).

Als Möglichkeiten der Energiespeicherung auf Güterwagen wurden folgende Typen von Sekundärbatterien bzw. Supercap-Kapazitäten betrachtet, und anhand der Werte der dekomponierten Anforderungen an die Energieversorgung entsprechend Abschnitt 5.5.1 bewertet. Die Bewertung erfolgt in Abschnitt 5.5.2.

- Blei-Akkumulatoren
- Nickel-Cadmium-Akkumulatoren
- Nickel-Metall-Hydrid-Akkumulatoren
- Nickel-Wasserstoff-Akkumulatoren
- Lithium-Ionen-Akkumulatoren
- Nickel-Schwefel- und Natrium-Schwefel-Akkumulatoren
- RAM-Akkumulatorzellen
- Supercaps

5.5.1 Anforderungen an Energiespeicher auf Güterwagen

Auch aufgrund der Erfahrungen in der Automobilindustrie liegt die Verwendung von Blei-Akkumulatoren nahe [HECHT 1999]. Die Auswahl der jeweiligen Akkumulator-Technologie darf hier allerdings nicht nur auf Erfahrungen fußen, sondern muss auch den Anforderungen genügen (vgl. Abbildung 5.9).

Die Anforderungen an die Energiespeicher wurden in Abschnitt 3.3.3 dekomponiert und in den Abbildungen 3.6 und 3.7 klassifiziert.

Energiespeicher sollen mit einer hohen Zuverlässigkeit innerhalb des Revisionsintervalls von sechs Jahren verfügbar und unempfindlich gegenüber Verschmutzung sein. Bahntechnische Systeme sollen nicht beeinflusst werden. Der Einsatztemperaturbereich wurde gemäß [EN50155 2001] entsprechend des geographischen Einsatzbereichs in Europa zwischen -25 und $+40^{\circ}\text{C}$ definiert. Die Lebensdauer eines Energiespeichers bis zum Erreichen der 80-prozentigen Speicherkapazität soll mehr als 3 Jahre bzw. mehr als 300 Ladezyklen erreichen. In Abbildung 5.9 sind die für die Bewertung der Energiespeicher für den Einsatz auf Güterwagen relevanten Anforderungen und deren Werte zusammenfassend dargestellt.

klassifizierte Anforderung	Wert
Selbstentladungsrate pro Monat	$< 25 \%$
Verschmutzungsanfälligkeit	keine
Zuverlässigkeit / Spannungs- & Stromfestigkeit / Festigkeit gegen ESD	hohe Zuverlässigkeit
Verfügbarkeit	jederzeit / unabh. vom Fahrzustand
Wartungsintervall	6 Jahre oder länger
Betriebssicherheit	keine Gefährdung der Betriebssicherheit
Temperatur / Umweltbedingungen (bes. Bedeutung für Akkumulatoren)	-25 bis $+40^{\circ}\text{C}$
Ladezyklen / Lebensdauer bis 80 % der Nennkapazität	> 300 / > 3 Jahre
Marktverfügbarkeit	keine
Wartungskosten	keine innerhalb des Wartungsintervalls
Einsetzbarkeit / Montage / Festigkeit gegen Umweltbedingungen	uneingeschränkt gegeben
Energiedichte	$> 35 \text{ Wh/kg}$
Verschleiß / Alterung	bedeutungslos innerhalb des Wartungsintervalls
Ladestrom / Schnellladefähigkeit	$> 0,2 \text{ C}$

Abbildung 5.9: Übersicht der klassifizierten Anforderungen für Energiespeicher und deren Werte

5.5.2 Bewertung möglicher Energiespeicher

Analog zu dem Vorgehen in Abschnitt 5.4.12 werden die klassifizierten Eigenschaften zunächst anhand der Priorisierung nach der Methode des *Paarweisen Vergleichs* (vgl. Abschnitt 2.3) gewichtet. Die Priorisierung ist Abbildung 5.10 zu entnehmen. Das Kriterium „Einsetzbarkeit“ unter den Umweltanforderungen fasst die Anforderungen bezüglich der Resistenz gegen Strahlung, gegen chemische und biologische Einflüsse und Dichtigkeit gegen Feuchtigkeit, Gasen und Feststoffen zusammen.

Die methodische Auswahl erfolgte durch die Erstellung einer Bewertungsmatrix (vgl. Abbildung 5.11). Dabei wurde jede Eigenschaft eines Energiespeichers mit ganzen Zahlen von „0“ bis „2“ bewertet. Der Wert „2“ wird dabei interpretiert als die Erfüllung der Anforderung im vollen Umfang, der Wert „1“ als Erfüllung der Anforderung mit Einschränkungen, die durch technische Maßnahmen toleriert werden können (also z.B. eine Kapselung zum Schutz vor Verschmutzung), und der Wert „0“ für die Nichterfüllung der Anforderung.

Alle Energiespeicher weisen einen gewissen Verschleiß auf, so dass nur Energiespeicher eingesetzt werden können, die das Wartungsintervall von 6 Jahren ohne Ausfall sicher überstehen. Hierbei kann auf Erfahrungen mit wartungsfreien Blei-Säure-Akkumulatoren aus dem Automotive-Bereich zurückgegriffen werden. Nickel-Cadmium-Akkumulatoren weisen eine etwas höhere Selbstentladungsrate, jedoch eine bis zu doppelt so große Energiedichte, einen erweiterten Temperaturbereich und eine höhere Zyklenzahl auf. Abbildung 5.12 zeigt die paradigmatische Darstellung der Eigenschaften der Energiespeicher anhand einer Eigenschaftenmatrix.

Ohne empirische Untersuchungen werden Ni-Cd-Akkumulatoren daher am besten bewertet, gefolgt von Supercap-Kapazitäten und Blei-Säure-Akkumulatoren (vgl. Abbildung 5.11). Eventuelle Kundenvorgaben sind in dieser Bewertung nicht berücksichtigt.

		geografisch	klimatisch	mechanisch	EMV	Einsetzbarkeit	Lebens- / Nutzungsdauer	Selbstentladungsrate p. Monat	Verschmutzungsanfälligkeit	RAMS(S)	Verschleißanfälligkeit	Energiedichte	Schnellladefähigkeit	Investitionskosten	Wartungskosten	Kundenpräferenz	Verfügbarkeit am Markt	Zeilensumme	GEWICHT [%]	Rang
Umweltanforderungen	geografisch		0	0	0	0	0	2	1	0	2	2	2	0	1	0	0	10	4,17	9
	klimatisch	2		2	1	2	1	2	2	0	2	2	2	2	2	2	0	24	10,00	2
	mechanisch	2	0		1	1	1	2	2	0	2	2	2	1	1	1	0	18	7,50	5
	EMV	2	1	1		1	1	2	2	1	1	1	2	1	1	2	0	18	7,50	5
	Einsetzbarkeit	2	0	1	1		1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	0	19	7,92	4
Zeitliche Anforderungen	Lebensdauer / Ladezyklen	2	1	1	1	1		1	2	1	2	2	2	2	2	1	0	21	8,75	3
	Selbstentladungsrate p. Monat	0	0	0	1	1	1		1	0	1	2	1	1	1	0	0	10	4,17	9
energetische Anforderungen	Verschmutzungsanfälligkeit	1	0	0	0	1	0	1		1	1	2	1	0	1	0	0	9	3,75	10
	RAMS(S)	2	2	2	1	1	1	2	1		2	2	2	2	2	2	0	24	10,00	2
	Verschleißanfälligkeit	0	0	0	1	0	0	1	1	0		2	1	2	1	1	0	10	4,17	9
	Energiedichte	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0		1	1	0	0	0	3	1,25	12
	Schnellladefähigkeit	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1		0	1	0	0	5	2,08	11
	Investitionskosten	2	0	1	1	0	0	1	2	0	0	1	2		1	1	0	12	5,00	7
	Wartungskosten	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	2	1	1		1	0	11	4,58	8
	Kundenpräferenz	2	0	1	0	1	1	2	2	0	1	2	2	1	1		0	16	6,67	6
	Verfügbarkeit am Markt	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		30	12,50	1
																		240	100	
		unwichtiger 0				gleichwichtig 1				wichtiger 2										

Abbildung 5.10: Priorisierung der Anforderungen für die Energiespeicher nach der Methode des „Paarweisen Vergleichs“

		Priorität [%]	Ni-Cd	Supercaps	Blei-Säure	Lilon	Ni-M-H	Ni-H2	RAM
Umweltanforderungen	geografisch	4,17	2	2	2	2	2	2	2
	klimatisch	10,00	2	2	2	1	1	1	1
	mechanisch	7,50	2	2	2	2	2	2	2
	EMV	7,50	2	2	2	2	2	2	2
	Einsetzbarkeit	7,92	2	2	2	2	2	2	2
Zeitliche Anforderungen	Lebensdauer / Ladezyklen	8,75	2	1	1	1	1	2	0
	Selbstentladungsrate p. Monat	4,17	1	2	1	1	0	0	2
energetische Anforderungen	Verschmutzungsanfälligkeit	3,75	2	2	2	2	2	2	2
	RAMS(S)	10,00	2	2	2	2	2	2	2
	Verschleißanfälligkeit	4,17	2	2	1	2	1	0	1
	Energiedichte	1,25	1	0	1	1	2	1	2
	Schnellladefähigkeit	2,08	2	2	1	1	1	0	1
	Investitionskosten	5,00	2	2	1	2	1	0	1
	Wartungskosten	4,58	2	2	2	2	2	2	2
	Kundenpräferenz	6,67	0	0	0	0	-1	-1	0
	Verfügbarkeit am Markt	12,50	2	2	2	2	2	2	1
		100,00							
Gewichtungspunktzahl			181	175	161	160	142	138	135
gewichteter Rangplatz			1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.

Eine Ablehnung des Kunden wird in der Bewertung mit "-1" bewertet.
Die fehlende Marktverfügbarkeit ist ein Ausschlusskriterium!

Abbildung 5.11: Gewichtete Bewertung der Energiespeicher

Eigenschaft	technisch		Blei-Säure	Ni-Cd	Ni-M-H	NI-H2	Li-Ion	RAM	SuperCap
		betriebl.							
Selbstentladungsrate pro Monat	x		5 %	7 % bis 30 °C 10 % innerh. 24 h nach Ladung und bis 40 % bei Temp über 45 °C (Panasonic)	ca. 15 % bei 20 °C ca. 40 % bei 45 °C	90 % (ca. 3 % pro Tag)	9 % (0,3 % pro Tag)	0,3 %	k.A.
Verschmutzungsanfälligkeit		x	unempfindlich bei geschützten und sauberen Elektroden	unempfindlich bei geschützten Elektroden	unempfindlich bei geschützten Elektroden	unempfindlich bei geschützten Elektroden	unempfindlich bei geschützten Elektroden	unempfindlich bei geschützten Elektroden	unempfindlich bei geschützten Elektroden
Zuverlässigkeit (Reliability) RAMS		x	zuverlässig	zuverlässig	zuverlässig	zuverlässig	zuverlässig	zuverlässig	zuverlässig
Verfügbarkeit (Availability) RAMS		x	jederzeit	jederzeit	jederzeit	jederzeit	jederzeit	jederzeit	jederzeit
Wartungsintervall / -aufwand (Maintainability) RAMS		x	nach Vorgabe des Herstellers gewährleistet bei Beachtung der Sicherheits- vorschriften	wartungsfrei	wartungsfrei	wartungsfrei	wartungsfrei	wartungsfrei	wartungsfrei
Betriebsicherheit (Safety) RAMS		x		gewährleistet	gewährleistet	sehr sicher (Raumfahrt)	gewährleistet	gewährleistet	gewährleistet
Temperaturbereich	x	x	Panasonic Stationary: -15 bis +50 °C / 0 bis +40 °C bei Ladung	-20 bis +65 °C / 0 bis +45 °C bei Ladung teilweise sind Temperaturen bis -40 °C erlaubt	-20 bis +60 °C / 0 bis +40 °C bei Ladung	-10 bis +35 °C	-20 bis +60 °C 0 bis +45 °C bei Ladung	-15 bis +65 °C	-40 bis +65 °C
Ladezyklen / Lebensdauer bis 80 % DoD	x		200 - 300 / 3 - 5 Jahre	500 bis 1500 / 2 - 3 Jahre	300 - 500 / keine Angaben	>50000 / 15 Jahre	250 bis 80 % DoD >10000 bis 20 % DoD / 2-3 Jahre	80 - 300 / keine Angaben	500000 / 10 Jahre
Hersteller / Verfügbarkeit		x	Panasonic	Panasonic, BYD	Panasonic, Sanyo, Varta, BYD	SAFT (Weltraumbatterie)	SAFT, BYD	AccuCell, ALCAVA, Grandcell und weitere	Maxwell ehem. Powercache (Ultracapacitor PC2500)
Betriebskosten		x	Wartung (Sicht- kontrolle und Reinigung) empfohlen	keine	keine	keine	keine	keine	keine
Kapazität	x		keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	50 - 218 Ah	keine Angabe	keine Angabe	bis 2500 F bis 2,17 Wh
Reale Energiedichte	x		35 Wh/kg	45 - 80 Wh/kg	60 - 120 Wh/kg	~ 60 Wh/kg	110 - 160 Wh/kg	80 Wh/kg	bis 2,99 Wh/kg (Gewicht 725 g)
Verschleiß	x		chemische Zersetzung	theoretisch nein	Diffusion	k.A.	stromabhängiger Verschleiß		
Ladestrom	x		0,2C	> 2C	0,5 - 1C	k.A.	<= 1C	0,2C	k.A.
Schnellladezeit	x		8 - 16 h	0,3 - 1 h	2 - 4 h	k.A.	3 - 4 h	2 - 3 h	k.A.

Abbildung 5.12: Eigenschaftenmatrix der Energiespeicher

5.6 Exemplarische Dimensionierung eines Photovoltaiksystems

5.6.1 Komponenten einer Photovoltaikanlage

Übliche Photovoltaikanlagen besitzen einen Laderegler ohne ein eigenes Energiemanagement (vgl. Abbildung 5.13), d.h. ohne Überwachung der Batterie und der Umgebungstemperatur [AECA 1996, BENZ 2002, HEINZE und MAYER 1999].

Sofern nicht im Laderegler integriert, ist zwischen Solargenerator und Laderegler eine Sperrdiode vorzusehen, welche die Rückspeisung elektrischer Energie in den Solargenerator während Dunkelzeiten, z.B. bei Nacht, verhindert. Der Laderegler überwacht den Ladezustand, d.h. die Batteriespannung, sowie die Lade- bzw. Entladeschlussspannung des Akkumulators und schützt ihn vor Überladung und Tiefentladung.

Ein Verbraucher bezieht seine Energie üblicherweise nicht direkt aus dem Photovoltaikgenerator, sondern aus einer Sekundärbatterie. Wesentlich für den Betrieb des Photovoltaiksystems ist somit die Anpassung der Batterie an den Solargenerator sowie die Anpassung des Verbrauchers an die Batterie [WAGNER 1999].

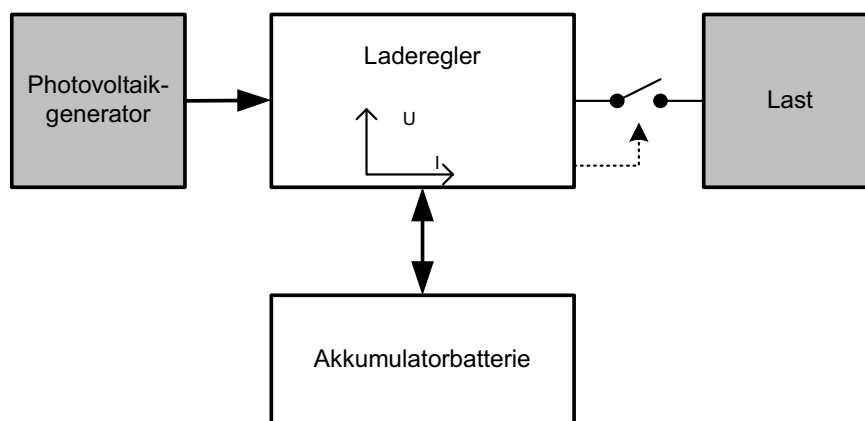


Abbildung 5.13: Typische Komponenten einer Photovoltaikanlage ohne Energiemanagement

5.6.2 Dimensionierung von Photovoltaiksystemen

Die Verfügbarkeit eines energieautarken Kommunikationsgeräts und damit des Kommunikationssystems selbst ist maßgeblich abhängig von der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Energieversorgung. Bei der Entwicklung des Energieversorgungssystems ist dafür Sorge zu tragen, dass zu jeder Zeit Energie verfügbar ist und die Energieversorgung für die Dauer einer Zugfahrt entsprechend der Nutzungsszenarien (vgl. Abschnitt

5.3) sichergestellt werden kann. Dies bedeutet gerade bei einer Energieversorgung durch den Einsatz eines Photovoltaiksystems, dass die gewonnene Energie z.B. für Nachtzeiten in einem Energiespeicher, z.B. einer Sekundärbatterie, gespeichert werden muss.

An dieser Stelle werden die Komponenten Photovoltaikgenerator und Energiespeicher eines Photovoltaiksystems für den Einsatz in dem zu entwickelnden Kommunikationssystem in Abhängigkeit vom Einsatzszenario entsprechend Abschnitt 5.3 zunächst qualitativ und in Abschnitt 5.6.4 quantitativ dimensioniert.

Dimensionierung des Energiespeichers

Wie bereits in Abschnitt 5.4.10 erwähnt, kann einem Photovoltaikgenerator nur dann Energie entnommen werden, wenn das Strahlungsangebot hinreichend ist. Für einen Betrieb von Geräten während der Nacht muss die Energie in einer Sekundärbatterie gespeichert werden. Die benötigte Kapazität dieser Sekundärbatterie kann anhand der folgenden Vorgehensweise abgeschätzt werden [WAGNER 1999, REICHELT 2003]:

1. Bestimmung des Energiebedarfs W_{Last} der i Verbraucher in Wh pro Tag mit jeweiliger mittlerer Leistung P_i und täglicher Dauer t_i :

$$W_{Last} = \sum_{i=1}^n P_i t_i \quad (5.1)$$

2. Zur Verbesserung der Verfügbarkeit des Systems wird die Batterie um den Autonomiefaktor A vergrößert. Der Autonomiefaktor gibt an, dass mit anfangs voll geladener Batterie über eine Dauer von A Tagen der Betrieb des Verbrauchers aufrechterhalten werden kann, ohne dass die Batterie nachgeladen werden muss. Dies dient der Überbrückung von Tagen mit witterungsbedingt geringerer Sonneneinstrahlung. Da aber auch an solchen Tagen die Batterie geringfügig nachgeladen wird, kann tatsächlich eine längere Schlechtwetterperiode als A Tage überbrückt werden. In konventionellen Photovoltaikanlagen wird $A = 3$ angenommen. Für den Einsatz in einem Energiespeicher für Wagengeräte auf Güterzügen wird dieser Autonomiewert ebenfalls angesetzt.

$$W_{Batterie} = A \cdot W_{Last} \quad (5.2)$$

Eine Batterie, deren gespeicherte Energie um den Faktor A größer ist als die tägliche Energieentnahme W_{Last} wird täglich auf die Entladetiefe D entladen. Daraus folgt für die Teilzyklenfestigkeit Z_T , die den Erwartungswert für die Lebensdauer der Batterie darstellt.

$$D = \frac{1}{A} \quad (5.3)$$

$$Z_T = A \cdot Z \quad (5.4)$$

3. Dem benötigten Energieangebot der Batterie $W_{Batterie}$ ist zusätzlich eine Leistungsreserve vom Faktor $\frac{1}{3} \hat{=} 33\%$ aufzuschlagen [REICHEL 2003]:

$$W_{Batterie_inkl_Reserve} = 1,33 \cdot W_{Batterie} \quad (5.5)$$

4. Die maximale Entladetiefe wird angenommen mit 50%. Somit ergibt ein Aufschlag mit Faktor 2 auf die benötigte Batteriekapazität:

$$W_{Batterie,opt} = 2 \cdot W_{Batterieinkl.Reserve} = 2 \cdot 1,33 \cdot A \cdot W_{Last} \quad (5.6)$$

5. Für benötigte Batteriekapazität C_N mit der Nennspannung U_N folgt:

$$C_N = \frac{W_{Batterie,opt}}{U_N} \quad (5.7)$$

Dimensionierung des Photovoltaikgenerators

In einem weiteren Schritt muss der Photovoltaikgenerator selbst dimensioniert werden. Dies kann anhand der folgenden Vorgehensweise erfolgen [WAGNER 1999]:

1. Das tägliche Strahlungsangebot G der Sonne von Sonnenaufgang SA bis Sonnenuntergang SU ist eine Funktion der Bestrahlungsstärke $E(t)$. Das Jahresmittel der täglichen Globaleinstrahlung liegt in Deutschland bei etwa $GA = 3 \text{ kWh/m}^2$. Zum Vergleich sei erwähnt, dass der Wert in den Tropen $GA = 7 \text{ kWh/m}^2$ beträgt [WAGNER 1999].

$$G = \int_{SA}^{SU} E(t) dt \quad (5.8)$$

2. Die täglich entnehmbare elektrische Energie W_{el} unter optimalen Bedingungen (Einstrahlungswinkel, vollständige Bestrahlung) beträgt

$$W_{el} = \int_d P_{max}(t) dt = \int_d \frac{P_{pk}}{E_0} \eta_{rel}(t) \cdot E(t) dt, \quad (5.9)$$

wobei der Mittelwert des relativen Wirkungsgrads des Photovoltaikgenerators mit $\eta_{rel} \approx 0,83$ bzw. $\frac{E_0}{\eta_{rel}} \approx 1,2 \frac{kW}{m^2}$ angenommen wird. Der Wert von η_{rel} schwankt im Tagesverlauf und ist abhängig von der klimatischen Einsatzregion. E_0 ist die Bestrahlungsstärke für Standardprüfbedingungen und ist angegeben mit $E_0 = 1 \frac{kW}{m^2}$.

Oben genannte Werte gelten für die Tropen. Der Wirkungsgrad ist in Europa aufgrund der niedrigeren Temperaturen und des dadurch höheren Wirkungsgrads des Photovoltaikgenerators größer, jedoch wird aus Gründen der globalen Einsetzbarkeit des Systems der geringere Wirkungsgrad für die Dimensionierung

des Photovoltaik-Systems herangezogen, was für den Einsatz in Europa eine Überdimensionierung der Generatoren, jedoch gleichzeitig eine Erhöhung der Verfügbarkeit bei einem Einsatz in gemäßigten Klimaregionen bedeutet.

3. Für die Spitzenleistung P_{pk} , die ein Photovoltaikgenerator besitzen muss um die elektrische Energie W_{el} an einem Tag mit der Globaleinstrahlung G zu liefern, gilt:

$$P_{pk} = \frac{E_0}{\eta_{rel}} \cdot \frac{W_{el}}{G} \Rightarrow P_{pk} \approx 1,2 \cdot \frac{W_{el} \text{ kW}}{G \text{ m}^2} \quad (5.10)$$

4. Unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade der Teilkomponenten ergibt sich für den Term $\frac{W_{el}}{G}$:

$$\frac{W_{el}}{G} = \frac{W_{Last}}{G \cdot \eta_{lr} \cdot \eta_{bat} \cdot \eta_{wr}} \quad (5.11)$$

5. Die entnehmbare Spitzenleistung ergibt somit zu:

$$\Rightarrow P_{pk} \approx 1,2 \cdot \frac{W_{Last}}{G \cdot \eta_{Anpassung} \cdot \eta_{Batterie} \cdot \eta_{Laderegler}} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \quad (5.12)$$

5.6.3 Dimensionierung des Photovoltaikgenerators unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit

Für sicherheitsrelevante Energieversorgungssysteme wird ein Verfügbarkeitsfaktor bei der Dimensionierung des Photovoltaiksystems einbezogen werden [WAGNER 1999]. Das daraus resultierende Vorgehensschema ist wie folgt:

1. Berechnung des täglich benötigten Energiebedarfs analog (5.1).
2. Berechnung der benötigten Batteriekapazität analog (5.7).
3. Überprüfung der erreichbaren Verfügbarkeit $\bar{a}(GA)$ bei der Dimensionierung mit dem Jahresmittel der Einstrahlung $G_{dim} = GA$.
4. Wird eine Verfügbarkeit von z.B. $\bar{a} > 95\%$ erreicht? Wenn ja, $G_{dim} = GA$ wählen, sonst G_{dim} anhand eines Graphen aus [WAGNER 1999] höher ansetzen ($G_{dim}(\bar{a} > 95\%) = \dots \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$).
5. Berechnung der optimalen Spitzenleistung des Photovoltaikgenerators:

$$\Rightarrow P_{pk,opt} \approx 1,2 \cdot \frac{W_{Last}}{G_{dim} \cdot \eta_{Anpassung} \cdot \eta_{Batterie} \cdot \eta_{Laderegler}} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \quad (5.13)$$

6. Überprüfung der sich aus der ausgewählten Realisierung ergebenden Verfügbarkeit:

$$G_{effektiv} = G_{dim} \cdot \frac{P_{pk,opt}}{P_{pk}} \quad (5.14)$$

5.6.4 Quantitative Dimensionierung einer Photovoltaikanlage in Abhängigkeit vom Nutzungsprofil

In Abschnitt 5.3 wurden drei Nutzungsszenarien entwickelt, für die nun überschlägig ein Energieversorgungssystem auf Basis eines Photovoltaiksystems dimensioniert wird. Dabei wird eine elektrische Last von 750 mW im Betrieb angenommen. Die Dimensionierung des notwendigen Energiespeichers mit Annahme eines Autonomiefaktors von $A = 3$ zeigt Abbildung 5.14.

Der Photovoltaik-Generator wird unter der Vorgabe der Verfügbarkeit vom $\bar{a} = 95\%$

	ei. Leistungsaufnahme	Nutzungsdauer pro Tag	Energiebedarf pro Tag	Autonomiefaktor	$W_{\text{Batterie, optimiert}}$	$C_{\text{Nenn, 12V}}$	$C_{\text{Nenn, 5V}}$
Szenario 1	0,75 W	4,00 h	3,00 Wh	3	24,00 Wh	2,00 Ah	4,80 Ah
Szenario 2	0,75 W	17,33 h	13,00 Wh	3	103,98 Wh	8,66 Ah	20,80 Ah
Szenario 3	0,75 W	14,80 h	11,10 Wh	3	88,80 Wh	7,40 Ah	17,76 Ah

Abbildung 5.14: Dimensionierung des Energiespeichers für verschiedene Nutzungsszenarien

entsprechend der Vorgehensweise aus Abschnitt 5.6.3 dimensioniert.

1. Die benötigten Energiebedarfe pro Tag und die erforderlichen Batteriekapazitäten abhängig vom Einsatzszenario sind in Abbildung 5.14 zusammenfassend dargestellt.
2. Die mittlere Verfügbarkeit \bar{a} in Abhängigkeit von der mittleren Einstrahlung $\bar{G} = 3 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ in Deutschland beträgt ca. 95%, so dass die Dimensionierungseinstrahlung G_{dim} des Photovoltaik-Generators nahezu der mittleren Einstrahlung entspricht, d.h. $G_{\text{dim}} = \bar{G} = 3 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$.
3. Die optimale Spitzenleistung $P_{pk, opt}$ des Photovoltaik-Generators wird entsprechend (5.13) berechnet. Dabei werden folgende typischen Werte für die Wirkungsgrade angenommen:

$$\eta_{\text{Anpassung}} = 0,95, \eta_{\text{Batterie}} = 0,8 \text{ und } \eta_{\text{Laderegler}} = 0,95.$$

Die optimalen Spitzenleistungen abhängig vom Nutzungsszenario sind Abbildung 5.15 zu entnehmen.

$P_{\text{peak,opt,Szenario1}}$	1,66 W
$P_{\text{peak,opt,Szenario2}}$	7,20 W
$P_{\text{peak,opt,Szenario3}}$	6,15 W

Abbildung 5.15: Dimensionierung des Photovoltaikgenerators in Abhängigkeit vom Nutzungsszenario

5.7 Zusammenfassung

Die Auslegung der Energieversorgung der Kommunikationsgeräte muss abhängig von den Randbedingungen wie Nutzungsszenario, Wartungsintervall, Lebensdauer und elektrischer Last der gewählten Hardware erfolgen. Der spezifische Energieverbrauch eines Fahrzeuggeräts ist, aufgrund der noch nicht ausgewählten Hardware, noch offen.

In diesem Abschnitt wurden unterschiedliche Energiequellen, Möglichkeiten der Energieerzeugung sowie -speicherung aufgezeigt, gegenübergestellt und jeweils mittels der Bewertungsmethode des *Paarweisen Vergleichs* eine Rangreihe ermittelt. Die analysierten Energiequellen und -erzeuger basieren dabei auf verschiedenen physikalischen Grundprinzipien, die in Abbildung 5.16 zusammenfassend dargestellt sind. In einem morphologischen Kasten sind Realisierungsvorschläge für die Energieversorgung je Einsatzszenario zugeordnet (vgl. Abbildung 5.17).

Kategorie	Kategorie	Energiezuführung	Energiewandlung	Energiespeicherung
mechanisch		Windrad	Dynamo	Akkumulator
		Savoniusrotor		
		Achsgenerator		
Strahlung		Solarzelle	photovoltaischer Effekt	
chemisch		Oxidation	Brennstoffzelle	
		Chemischer Prozess	Primärzelle	
			Sekundärzelle	
seismisch		Masseträgheit	Piezoeffekt	
Luftdruck		Wind	Druckluftgenerator /	
			Dynamo	
induktiv		Feder-Magnet-Schwinger	Induktionsgesetz	

Abbildung 5.16: Grundprinzipien der Energiewandlung und -erzeugung

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Energiebedarf pro Jahr	584,7 Wh	155,7 Wh	2,89 kWh
Energiequellen	1. Primärzellen 2. Achsgenerator 3. Solargenerator		
Energiespeicher	1. Ni-Cd-Akkus 2. Supercaps 3. Blei-Säure-Akkus 4. Li-Ion-Akkus		

Abbildung 5.17: Realisierungsvorschläge der Energieversorgung abhängig vom Einsatzszenario

Kapitel 6

Kommunikation

Im Folgenden werden Grundlagen der Funkkommunikation, mögliche Topologien, ein möglicher Telegrammaufbau gemäß [EN50159-2 2002], Funktechnologien, existente Probleme beim Busaufbau und deren Lösung sowie ein Inaugurationsverfahren behandelt und eine sinnvolle Kombination ausgewählt (vgl. Abbildung 6.1).

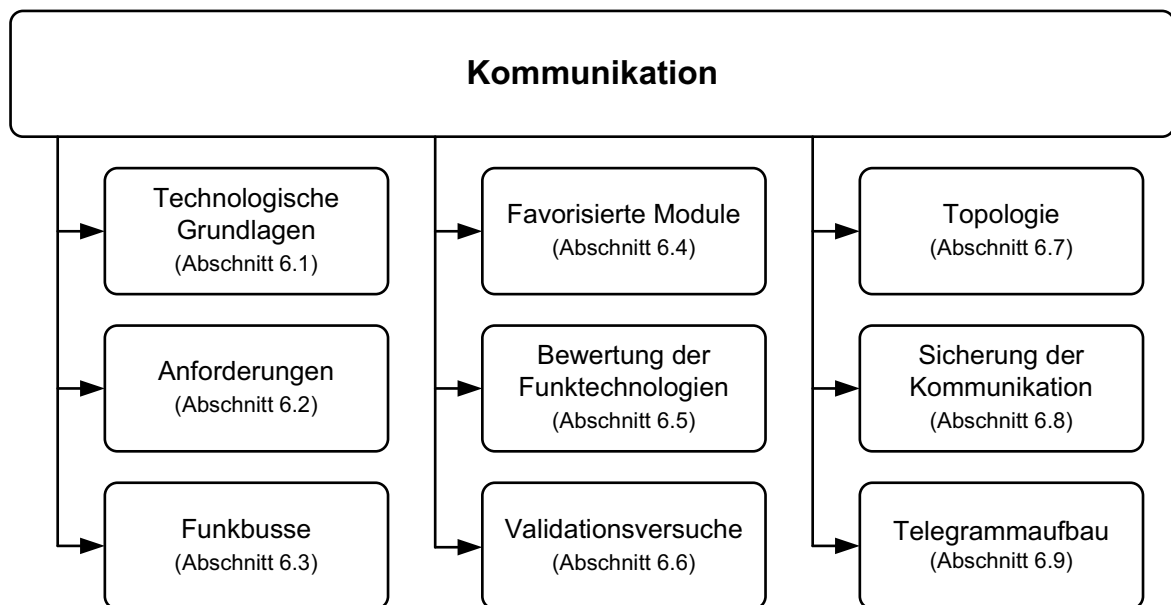


Abbildung 6.1: Gliederung des Kapitels Kommunikation

6.1 Technologische Grundlagen

6.1.1 Das ISO-OSI-Referenzmodell der Kommunikation

Eine Kommunikation zwischen zwei Kommunikationspartnern basiert auf sogenannten Protokollen oder Diensten. Das siebenstufige ISO-OSI-Referenzmodell strukturiert diese in übereinanderliegende Schichten, die jeweils Teilaufgaben des Kommunikationsvorgangs übernehmen, wobei sich die n -te Schicht nur auf Leistungen und Dienste der $(n - 1)$ -ten Schicht stützt. Häufig sind nicht alle Schichten ausgebildet, da Funktionen der nicht ausgebildeten Schichten von Diensten übergeordneter Schichten übernommen oder nicht benötigt werden.

- *Schicht 1* ist die Bitübertragungsschicht (physical layer) und stellt die unterste Schicht des ISO-OSI-Referenzmodells dar. Sie beschreibt alle Eigenschaften der physikalischen Übertragung, d.h. Übertragungsverfahren, Codierung der Information, Signalpegel und das Protokoll. Bei einer Funkkommunikation ist dies die Luftschnittstelle mit den verschiedenen Frequenzen und Modulationsverfahren.
- *Schicht 2* ist die Sicherungsschicht (data link layer). Diese Schicht ist für Aufbau, Abbau und Aufrechterhaltung einer oder mehrerer Verbindungen verantwortlich. Dazu gehört die Absicherung der Übertragung durch Fehlererkennungs- bzw. -korrekturmechanismen, Datenflusskontrolle und die Steuerung des Zugriffs auf das Übertragungsmedium.
- *Schicht 3* ist die Vermittlungsschicht (network layer). Sie legt den Datenpfad fest, über den die Nachrichten übertragen werden sollen. Dies ist z.B. notwendig, wenn abweichend vom Konzept der Punkt-zu-Punkt-Verbindung mehrere unterschiedliche Datenpfade möglich sind.
- *Schicht 4* ist die Transportschicht (transport layer). Diese Schicht schirmt die höheren, anwendungsorientierten Schichten gegenüber den netzorientierten Schichten ab, kann mehrere Kanäle einrichten, Daten in Pakete teilen bzw. zusammensetzen, Pakete in die richtige Reihenfolge sortieren bzw. unabhängig von der ursprünglichen Reihenfolge versenden und Pakete bei Fehlern oder Verlust erneut anfordern bzw. senden.
- *Schicht 5* ist die Sitzungsschicht (session layer). Sie enthält Dienste zum Aufbau, Abbau und Überwachen von Verbindungen und Dienste zur Datenflusskontrolle.
- *Schicht 6* ist die Darstellungsschicht (presentation layer). Diese Schicht gibt den übertragenen Nachrichten eine andere, für die Anwendung verständliche Darstellungsform, z.B. die Ver- oder Entschlüsselung von Anwenderdaten.
- *Schicht 7* ist die Anwendungsschicht (application layer). Sie stellt Programmierschnittstellen für die an den Knoten der Kommunikationsverbindung arbeitenden Prozesse zur Verfügung.

6.1.2 Topologische Grundstrukturen

Für die Kommunikation im Allgemeinen und innerhalb eines Fahrverbands im Speziellen kann die Schicht 3 des ISO/OSI-Modells verschieden geartet sein, d.h. es sind unterschiedliche Topologien der Funkkommunikation denkbar [BIELEFELD et al. 2002, BOCK 2001, JASMER et al. 2004, TALKE und WIEMERS 2002a, SCHNIEDER 1993, WALKE 2001]. Folgende Grundstrukturen sind als Stand der Technik anzusehen.

Stern-Funktions-Topologie

Die einfachste Grundstruktur aus funktionaler Sicht ist die Stern-Topologie. Aufgrund der typischen geographischen Formation der Kommunikationsteilnehmer wird diese Topologie auch „*Direct Link*“ genannt. Bei ihr wird von der Kommunikationseinrichtung des Führungsfahrzeugs zu jeder Kommunikationseinrichtung eines zum Fahrverband gehörenden Fahrzeugs jeweils eine Funkverbindung aufgebaut (vgl. Abbildung 6.2). Eine Reihungsliste ist für die Businitialisierung nicht erforderlich [BOCK 2001].

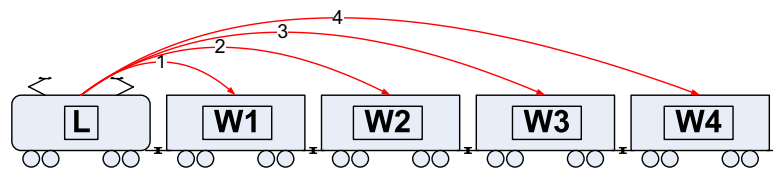


Abbildung 6.2: Funkverbindungen der Stern-Topologie

Bus-Funktions-Topologie

Eine weitere Grundstruktur aus funktionaler Sicht stellt die Bus-Topologie dar (vgl. Abbildung 6.3). Dabei wird ausgehend von der Kommunikationseinrichtung des Führungsfahrzeugs zu der Kommunikationseinrichtung des jeweils nächsten Fahrzeugs eine Funkverbindung aufgebaut. Dazu ist die Kenntnis der genauen Fahrzeugreihung obligatorisch [BOCK 2001].

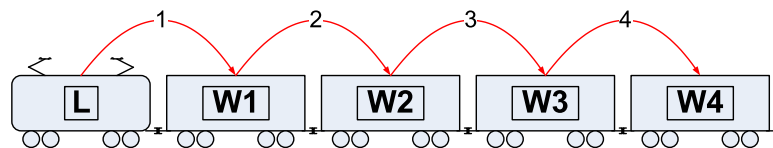


Abbildung 6.3: Funkverbindungen der Bus-Topologie

Baum-Funktions-Topologie

Für den Einsatz einer Baum-Funktions-Topologie in einem Fahrverband ergibt sich aus Verfahrenssicht eine Funkzellenstruktur entsprechend [TALKE und WIEMERS 2002a].

Diese Struktur ist z.B. einzusetzen für DECT-basierte Funksysteme im Zugverband (vgl. Abschnitt 4.1.5). Technologiebedingt kann eine DECT-Basisstation nur mit einer begrenzten Anzahl von Kommunikations-Klienten Verbindungen aufbauen, d.h. die prinzipiell einfachste Netzstruktur der Direktverbindungen lässt sich bei Fahrverbänden mit einer zu großen Anzahl von Kommunikationsteilnehmern bei Nutzung der DECT-Technologie nicht realisieren. In [TALKE und WIEMERS 2002a] wurde eine Lösung für eine Netzstruktur mit mindestens vier Kommunikationseinrichtungen, und für prinzipiell beliebig lange Fahrverbände zum Patent angemeldet, welche auf der Struktur verketteter Funkzellen basiert (vgl. Abbildung 6.4). Eine Reihungsliste des Fahrverbandes ist zwingend erforderlich [BOCK 2001].

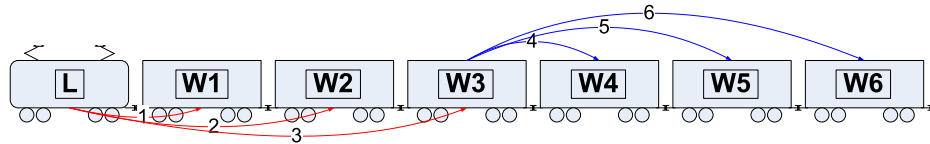


Abbildung 6.4: Funkverbindungen der Topologie „Chained Cells“

6.1.3 Physikalische Eigenschaften der Funkkommunikation

Auf die erste Schicht des ISO-OSI-Referenzmodells (vgl. Abschnitt 6.1.1) wirken Dämpfungseffekte und Störeffekte.

Dämpfungseffekte

Ein ideales Übertragungssystem ist charakterisiert durch eine Quelle, einen verlustlosen Kommunikationskanal und eine Senke. In der Praxis ist der Kanal jedoch immer verlustbehaftet durch thermisches Rauschen oder Widerstandsrauschen. Charakterisiert ist der Übertragungskanal durch das Verhältnis der Empfangsleistung P_E zur Sendeleistung P_S . Dieses Verhältnis der elektromagnetischen Wellen bei Freiraumausbreitung wird durch die Frii'sche Formel in (6.1) beschrieben [BALANIS 2005]. Die Formelzeichen sind in Tabelle 6.1 aufgelistet.

$$\frac{P_E}{P_S} = \eta_S (1 - |\Gamma_S|^2) D_S \cdot \eta_E (1 - |\Gamma_E|^2) D_E \cdot \eta_\varphi \cdot \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (6.1)$$

Diese Formel lässt sich vereinfacht ausdrücken durch (6.2).

$$\frac{P_E}{P_S} = g_S \cdot g_E \cdot \eta_\varphi \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (6.2)$$

d	Abstand zwischen den Antennen
D_S	Richtwirkung der Antenne auf Senderseite
D_E	Richtwirkung der Antenne auf Empfängerseite
η_S	Antennenwirkungsgrad auf der Senderseite
η_E	Antennenwirkungsgrad auf der Empfängerseite
η_φ	Antennenanpassungs- und Polarisationsverluste
g_S	Gewinn der Sendeantenne
g_E	Gewinn der Empfangsantenne
Γ_S	Reflexionsfaktor am Antennenausgang
Γ_E	Reflexionsfaktor am Antenneneingang
λ	Wellenlänge der Funkübertragung
L	Freiraumdämpfung
P_S	Sendeleistung
P_E	Empfangsleistung

Tabelle 6.1: Formelzeichen aus (6.1) und (6.2)

Wegen der willkürlichen Ausrichtung der Sende- und Empfangsantennen zueinander ist der Einsatz von Antennen mit Rundstrahlcharakteristik erforderlich. Aus den begrenzten Bauvolumina sowie den nicht vorhandenen Freiraumbedingungen durch die Einbettung der Funkmodule und der Antennen in die mechanischen Aufbauten resultieren ebenfalls Verluste. Berücksichtigt werden diese unterschiedlichen Umgebungsbedingungen in einem modifizierten Modell durch den Ausbreitungskoeffizienten γ [HASHEMI 1993]. Für diesen Ausbreitungskoeffizienten gilt bei Freiraumausbreitung $\gamma = 2$, bei städtischer Bebauung $\gamma = 5$, d.h. in der Realität nimmt die Empfangsleistung schneller als mit dem Quadrat des Abstandes d^2 zwischen Sender und Empfänger ab. Durch einen sog. Diversity-Empfänger mit zwei Antennen im Abstand $n \cdot \frac{\lambda}{2}$ kann der Empfangspegel unter Umständen erheblich verbessert werden. Diese Antennenanpassungs- und Polarisationsverluste sind durch den Faktor η_φ in der Formel 6.1 berücksichtigt. Somit ergibt sich

$$\frac{P_E}{P_S} = g_S \cdot g_E \cdot \eta_\varphi \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \cdot \frac{1}{d^\gamma} \quad (6.3)$$

Unter den idealisierten Annahmen $\eta_S \cdot D_S = 1$ und $\eta_E \cdot D_E = 1$ lässt sich aus 6.1 das Streckendämpfungsmaß L_P berechnen:

$$L_P[dB] = 10 \cdot \log \left(\frac{P_S}{P_E} \right) \quad (6.4)$$

Störeffekte

Gerade im Bahnumfeld sind aufgrund der Funkausbreitung der Signale Beeinflussungen in der Schicht 1 des ISO-OSI-Referenzmodells zu erwarten. Existente Abschattungseffekte, Mehrwegeausbreitung und die Dynamik der Kommunikationspartner führen

dazu, dass die realen Feldstärken, die von den meisten Funkkommunikationsmodulen in Form des sogenannten Received Signal Strength Indicators (*RSSI*) ausgegeben wird, stark von den theoretischen Mittelwerten abweichen [SCHOLL et al. 2007]. Die zu erwartenden Beeinflussungsfaktoren sind:

- Dämpfung
- Rauschen mit dem Signal-Rausch-Verhältnis $SR = 10 \cdot \log \left(\frac{\text{Signalpegel}}{\text{Rauschpegel}} \right)$ [dB] und dem thermischen Rauschen $\Delta N = 4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f$ [W]
- Dämpfungsverluste durch Einfach- oder Mehrfachreflexion und Mehrwegeausbreitung
- Dispersion eines zeitlich verzögerten Signals durch Mehrwegeausbreitung (Laufzeitdifferenzen unterschiedlicher Ausbreitungswege), die als Root-Mean-Square-Delay-Spread (RMS-Delay) bezeichnet werden.
- Schwund oder Fading, z.B. durch Mehrwegeausbreitung aufgrund von Reflexion oder Streuung (phasenverschobene konstruktive oder destruktive Interferenz). Abhilfe kann ein Diversity-Empfänger mit zwei Antennen im Abstand $d = n \cdot \frac{\lambda}{2}$ schaffen.
- Beugung, d.h. die Beeinflussung sich ausbreitender Wellen an Hindernissen. Der Effekt der Beugung kann erst ab Frequenzen oberhalb von etwa 5 GHz vernachlässigt werden.
- Abschattung (Shadowing), d.h. Dämpfung durch Hindernisse im direkten Weg zwischen Quelle und Senke. Dieser Effekt, der auch als „Shadowing“ bezeichnet wird, ist neben der Reflexion im Bahnumfeld besonders ausgeprägt.
- Man-made noise, d.h. externe Störungen, hervorgerufen durch andere Kommunikationssysteme im gleichen Frequenzband.

Charakterisierung der Bitfehlerrate

Ziel jeder Funkkommunikation ist eine möglichst fehlerfreie Informationsübertragung. Die Bitfehlerrate p ist ein Maß für die Störempfindlichkeit eines Übertragungskanals. Sie stellt das Verhältnis der Anzahl fehlerhafter Bits zur Anzahl der gesendeten Bits dar. Durch Einsatz einer Fehlererkennung kann festgestellt werden, ob das übertragene Datenwort gültig ist. Eine Korrektur ist nicht möglich. Für mobile Kommunikationssysteme wird eine Restbitfehlerwahrscheinlichkeit von weniger als 10^{-7} angestrebt [BRUNS 2002]. Für die Restbitfehlerwahrscheinlichkeit P_e eines Codes gilt mit den Formelzeichen aus Tabelle 6.2 [WALKE 2001]:

$$P_e = \frac{2^k - 1}{2^n} \approx 2^{-(n-k)} \quad (6.5)$$

- k Anzahl der Bits vor Codierung (Datenwortlänge)
 n Anzahl der Bits nach Codierung (Codewortlänge)
 P_e Restfehlerwahrscheinlichkeit

Tabelle 6.2: Formelzeichen aus (6.5)

6.2 Anforderungen an die Funkkommunikation

Die Anforderungen an die Funkkommunikation wurden bereits in Abschnitt 3.3.2 klassifiziert und dekomponiert. Die Werte der dekomponierten Größen sind in Abbildung 6.5 dargestellt und werden für die Bewertung in Abschnitt 6.5 herangezogen.

	Eigenschaft	Merkmal	Wert	betriebliche Anforderung	funktionale Anforderung	technische Anforderung
Allgemeine Anforderungen	HF-Kanal	Sendeleistung	nicht mehr als gesetzlich entspr. ETSI zulässig, abh. von Funktechnologie			x
		Anzahl der Teilnehmer	max. 65535 (2 Byte-Adressbereich)	x		x
		Übertragungsrichtung	bidirektional		x	
		Gesetzeskonformität	ETSI			x
	RAMS(S)	Telegrammaufbau	entspr. EN50159-2		x	
		Frequenzbereich	lizenzfrei nutzbar			x
		Bitfehlerrate	kleiner als 10^{-7}		x	x
		Fehlersicherung	entspr. Bitfehlerrate			x
		Verschlüsselung	entspr. EN50159-2		x	
	Zeitverhalten	Initialisierungszeit	höchstens 10 Minuten & spätestens 30 Sekunden nach Abfahrt		x	
		Betriebszeit	entsprechend Nutzungsprofil	x	x	
		Sendelatenz	Weiterleitungsgeschwindigkeit abh. von Zuglänge mehr als 250m/s	x		x
		Sendehäufigkeit d. Wagengeräte	Einflussnahme auf Sendehäufigkeit der Wagen-Kommunikationsgeräte durch den Busmaster		x	
	Hardware	Datenrate	gering (mehr als 250 kBit/s)			x
		Anbieter / Marktverfügbarkeit	gesichert, auch zukünftig	x		
		Anschaffungspreis	Kosten-Nutzen optimiert	x		
		Betriebskosten	kostenneutral	x		
	Telegrammtypen	Meldungen	Statusmeldungen beliebiger Sensorik		x	
		Alarme	Alarmmeldungen (z.B. Bremsenverschleiß, u.ä.)		x	
Geometrische Anforderungen	Geometrie	Montage	Beachtung d. Lichtraumprofils	x		
		Reihung	beliebig	x		
Umweltbedingungen	Beeinflussung Klima	EMV-Festigkeit	EN50121-3-1 & EN50121-3-2	x		x
		Temperaturbereich	-25 °C bis +40 °C (EN50155)			x
Elektrische Anforderungen	Energiebedarf	Senden	minimal			x
		Empfangen				
		Standby				
	ESD	Festigkeit	muss gewährleistet sein			x
Technologische Anforderungen	Technologie	Migration	Mischbetrieb mit von ausgerüsteten und nicht ausgerüsteten Wagen soll möglich sein			x
		Topologie	Vermeidung von Telegrammweiterleitungen		x	x
		Organisation	verbindungsorientiert			x
		Übertragungsmedium	Funk			x
		Funkreichweite	mindestens 750 m			x
		Einsetzbarkeit		x		x
Kundenpräferenz		Kundenpräferenz	entsprechend der Projektentwicklung	x		

Abbildung 6.5: Anforderungen an die Kommunikation

6.3 Funkbusse

Funkbusse werden aufgrund des gegenüber drahtgebundenen Bussystemen geringeren Installationsaufwands zunehmend bei der Gebäudeautomatisierung eingesetzt. Auf der anderen Seite sind funkbasierte Bussysteme sensibler gegenüber unbeabsichtigten und beabsichtigten Störungen und Angriffen. Entscheidend sind hier das eingesetzte Modulations- und das Buszugriffsverfahren.

6.3.1 Modulationsverfahren

Modulationsverfahren beschreiben die Art und Weise der Bitübertragung und lassen sich folglich der Schicht 1 des ISO-OSI-Modells zuordnen (vgl. Abschnitt 6.1.1). Analoge Modulationsverfahren sind relativ störungsempfindlich und werden an dieser Stelle nicht betrachtet. Digitale Modulationsverfahren verändern die genutzte Trägerwelle diskret. Anstatt des Begriffs Modulation wird bei den digitalen Modulationsverfahren oft der Begriff „Umtastung“ oder „Umschaltung“ (engl. „shift keying“) verwendet.

Amplitudenumtastung (ASK)

Bei dem digitalen Modulationsverfahren der Amplitudenumtastung (Amplitude Shift Keying - ASK) wird die Amplitude der Trägerwelle in wenigen diskreten Werten verändert

Frequenzumtastung (FSK)

Entgegen der Frequenzmodulation bei der analogen Übertragung werden bei der Frequenzumtastung (Frequency Shift Keying - FSK) mehrere ähnliche aber leicht unterschiedliche feste Trägerfrequenzen verwendet. Zur Informationsübertragung wird zwischen den verschiedenen Frequenzen umgeschaltet.

Eine spezielle Variante der Frequenzumtastung ist das Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK). GFSK zeichnet sich dadurch aus, dass der Oberwellenanteil durch Gauß-Filterung reduziert wird. Dadurch wird die Spektralbreite begrenzt und ein Übersprechen zwischen Nachbarkanälen reduziert.

Phasenumtastung (PSK)

Die Phasenumtastung (Phase Shift Keying - PSK) wird häufig angewandt. Bei dieser Modulationsart wird die Trägerfrequenz in diskreten Abständen verändert. Die größte Anforderung ist es, bei der plötzlichen Umtastung der Phase die gewünschten Frequenzverläufe zu erzeugen.

Eine spezielle Variante der Phasenumtastung ist die Quadratur-Phasenumtastung (QPSK),

bei der pro Sendesymbol zwei Bits übertragen werden können, wobei sich die Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Bandbreite verdoppelt.

Binäre Umtastung (OOK)

Durch einfaches An- und Ausschalten der Trägerwelle zeichnet sich die binäre Umtastung (On-Off Keying - OOK) aus. Sie stellt eine extreme Form der Amplitudenumtastung dar, wobei die Amplitude z.B. für ein Bit mit dem Wert „0“ auch Null ist.

6.3.2 Modulation durch Frequenzspreizung

Gerade bei der drahtlosen Kommunikation finden Modulationsverfahren mit Frequenzspreizung Anwendung. Die beiden typischen Vertreter sind das Frequenzsprungverfahren (FHSS) und das Frequenzspreizungsverfahren (DSSS).

Frequenzsprungverfahren FHSS

Bei dem Frequenzsprungverfahren FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) wird die Trägerfrequenz entsprechend des Spreizsignals pseudo-zufällig und diskret gewechselt.

Bandspreizungsverfahren DSSS

Bei dem DSSS-Verfahren zur direkten Bandspreizung (Direct Sequence Spread Spectrum) wird ein Nutzsignal mit einem Spreizsignal multipliziert und so auf mehrere Frequenzen innerhalb des Übertragungsbandes gespreizt. Durch die Spreizung ist eine größere Bandbreite zur Übertragung notwendig. Gleichzeitig wird die Energiedichte im Spektrum reduziert, so dass andere Signale weniger gestört werden. Das DSSS-Verfahren wird oft in Verbindung mit dem Zugriffsverfahren des Codemultiplexens (CDMA) eingesetzt (vgl. Abschnitt 6.3.3).

6.3.3 Zugriffsstrategien

Die Zugriffsstrategien sind Bestandteil der Schicht 2 des ISO-OSI-Referenzmodells (vgl. Abschnitt 6.1.1). Die hier vorgestellten Zugriffsstrategien dienen der Optimierung der Kapazitätsausnutzung eines Übertragungsmediums, indem gleichzeitig mehrere Verbindungen im Multiplex übertragen werden. Für Funkssysteme werden im wesentlichen die folgenden vier Verfahren unterschieden.

FDMA - Frequency Division Multiple Access

Bei dem Frequenzmultiplex-Verfahren (FDMA) wird das für das Funkssystem zur Verfügung stehende Frequenzspektrum in mehrere Frequenzbänder unterteilt, welche gleichzeitig genutzt werden können [WALKE 2001].

Jedes Frequenzband wird als physikalischer Kanal gesehen, dem jeweils zwei oder mehreren Stationen zur Kommunikation zugewiesen werden. Die einzelnen Bänder sind durch Schutzbänder voneinander getrennt (Kanalabstand).

TDMA - Time Division Multiple Access

Bei dem Zeitmultiplex-Verfahren (TDMA) wird ein Funkkanal mit seiner gesamten Bandbreite periodisch abwechselnd mehreren Kommunikationsbeziehungen zugeteilt, indem dieser in Zeitschlitz (Slots) unterteilt wird, die dann jeder Station periodisch für eine fixe oder variable Dauer zugeteilt werden [WALKE 2001].

Das TDMA-Verfahren ist zwar frequenzökonomischer als das FDMA-Verfahren, erfordert jedoch einen höheren technischen Aufwand durch die notwendige Synchronisation von Sender und Empfänger.

CDMA - Code Division Multiple Access

Kennzeichnend für das Codemultiplexverfahren ist die Übertragung eines schmalbandigen Funksignals in einem breitbandigen Frequenzspektrum, wobei das schmalbandige Signal durch eine geeignete Codierungsvorschrift auf ein breitbandiges Signal abgebildet wird (Codespreizung) [WALKE 2001].

Jeder Benutzer des Funkkommunikationssystems verwendet jeweils eine eigene Codierungsvorschrift, welche so gewählt werden muss, dass die Interferenzen der zeitgleich übertragenen Signale bei den Empfängern minimal sind. Je mehr Codekanäle in einem Frequenzband verwendet werden, desto höher wird das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (Signal to Noise Ratio, SNR), so dass die Anzahl der Teilnehmer in einem Kanal begrenzt ist.

Zur Realisierung der spektralen Spreizung des Signals werden in der Praxis hauptsächlich zwei Verfahren eingesetzt:

- Direct Sequence (DS), wobei die Codeaufspreizung orthogonale Codekanäle erzeugt, deren Summensignal näherungsweise Null ist
- Frequency Hopping (FH), wobei Sender und Empfänger in schneller Folge synchron die Übertragungssequenz wechseln

Die Vorteile des CDMA-Verfahrens sind, dass keine Zeitsynchronisation der verschiedenen Sender erforderlich und dass es resistenter gegenüber zufälligen oder gezielten Störungen ist. Nutzsignale stark einfallender Sender stören jedoch die Signale schwächerer Sender erheblich [WALKE 2001].

SDMA - Space Division Multiple Access

Das Raummultiplex-Verfahren (SDMA) bezeichnet die räumliche Aufteilung der verwendeten Frequenzen, wie es z.B. beim GSM-Mobilfunk durch Bildung von Funkzellen angewandt wird. Das Raummultiplex-Verfahren nutzt die Ausbreitungsdämpfung eines Funksignals mit dem Abstand vom Sender (vgl. Abschnitt 6.1.3). Bei einem genügend großen Abstand vom Sender ist das Signal so schwach, dass die Störungen durch Interferenz bei Wiederverwendung dieser Frequenz durch einen anderen Sender toleriert werden können (Clusterprinzip) (vgl. [WALKE 2001]).

CSMA - Carrier Sense Multiple Access

Die Zugriffsstrategie mit Trägerprüfung (Carrier Sense Multiple Access - CSMA) bezeichnet ein Zugriffsverfahren mit Busarbitration z.B. in Feldbussystemen und in der Netzwerktechnik (Ethernet). Dabei prüft der Teilnehmer vor dem Buszugriff den Status des Mediums. Bei dem Buszugriff wird zwischen zwei Varianten unterschieden, dem Buszugriff mit Kollisionserkennung (CSMA/CD) und dem mit Kollisionsvermeidung (CSMA/CA).

Bei dem CSMA/CD-Verfahren wird die aktuelle Sendung nach Detektion einer Kollision abgebrochen und nach einer stochastischen Zeit erneut gesendet. Dieses Verfahren wird z.B. in der Netzwerktechnik Ethernet (IEEE 802.3) eingesetzt.

Bei dem CSMA/CA-Verfahren wird eine Kollision bei einem gleichzeitigen Sendebeginn vermieden, indem das Medium vorher arbitriert wird. Dieses Verfahren ist nicht-deterministisch und wird z.B. bei CAN-Bussen eingesetzt.

Aloha

Das Aloha-Verfahren wird als die erste Zugriffsstrategie mit Zufallsstrategie bezeichnet. Dabei sendet eine sendebereite Station ohne vorher den Zustand des Übertragungsmediums zu überprüfen. Durch Kollision zweier Nachrichten werden beide zerstört, so dass dieses Verfahren die korrekte Übertragung mit dem Senden eines Antworttelegramms überwacht. Dadurch wiederum wird der Verkehr auf dem Medium deutlich erhöht und die Effizienz herabgesetzt.

6.3.4 Einordnung der betrachteten Funktechnologien

Als Vorgriff auf die in Abschnitt 6.3.5 vorzustellenden Funktechnologien werden diese in Abbildung 6.6 vorab bezüglich ihrer technologischen Eigenschaften eingeordnet und gegenübergestellt. Betrachtet wurde dabei die Kommunikation bezogen auf die Schicht 1 und 2 des ISO/OSI-Modells sowie die Reichweite und der Energiebedarf.

	Frequenzbereich	Spitzverfahren	Modulation	Sendepiegel	Zugriffsverfahren	Datenpfad / Topologie	Anzahl der Kanäle	Reichweite	Datenrate	Energiebedarf Senden	Energiebedarf Empfangen
RF-Modem 24XStream (MaxStream)	2,4 GHz ISM	FHSS	k.A.	50 mW (17 dBm)	FDMA	- Punkt-zu-Punkt - Pkt-zu-Mehrpunkt - Peer-to-Peer	7	180 m (Gebäude) bis 5 km mit Dipolantenne im Freien	max 9,6 kBit/s	750 mW	250 mW
RF-Modem (AeroComm)	2,4 GHz ISM	FHSS	k.A.	k.A.	FDMA	- Punkt-zu-Punkt - Pkt-zu-Mehrpunkt - Peer-to-Peer - Client-Server	40 in Europa	max ca. 122 m (Gebäude) bis 1,8 km (im Freien)	bis 576 kBit/s	800 mW	250 mW
"ZigBee" / XBee-PRO (IEEE 802.15.4)	2,4 GHz ISM	DSSS	QPSK	100 mW (20 dBm)	CSMA/CA	- Punkt-zu-Punkt - Pkt-zu-Mehrpunkt - Peer-to-Peer - Maschen	12	100 m (Gebäude) bis 1,6 km (Freifeld)	bis 250 kBit/s	709,5 mW	181,5 mW
DECT	1880 - 1900 MHz	k.A.	GFSK	250 mW (24 dBm)	TDMA/FDMA	Peer-to-Peer	10	bis 300 m	19,2 kBit/s (pro Kanal)	385 mW	42 mW
"ZigBee"	2,4 GHz ISM	DSSS	QPSK	1 mW (0 dBm)	CSMA/CA	- Punkt-zu-Punkt - Pkt-zu-Mehrpunkt - Peer-to-Peer - Maschen	16	bis 100 m	bis 250 kBit/s	148,5 mW	165 mW
EnOcean Transceiver (TCM 120)	868,3 MHz ISM	k.A.	ASK	10 mW (10 dBm)	k.A.	Broadcast	1	30 m (Gebäude) 300 m (Freifeld)	bis 120 Bit/s	150 mW	150 mW
NanoNET (IEEE 802.15.4a)	2,4 GHz ISM	CSS	OOK	6,3 mW (8 dBm)	- Aloha - TDMA - CSMA/CA	k.A.	k.A.	max 60 m in Gebäuden 900 m im Freien	500 kBit/s, 1 MBit/s oder 2 MBit/s	285 mW	120 mW
Bluetooth Klasse 1 (IEEE 802.15.1)	2,4 GHz ISM	FHSS	GFSK	100 mW (20 dBm)	TDMA	Ad-hoc	79	bis 100 m	bis 2,1 MBit/s	396 mW	132 mW
WLAN (IEEE 802.11b)	2,4 GHz ISM	FHSS	GFSK	100 mW (20 dBm)	FDMA	- Ad-hoc - Infrastruktur	11	bis 300 m	bis 11 MBit/s	1,04 W	881 mW

Abbildung 6.6: Betrachtete Funktechnologien

6.3.5 Funktechnologien

Für die Realisierung der Intrazugkommunikation soll ein drahtloses und, bezogen auf den Fahrverband, lokales Kommunikationssystem eingesetzt werden.

Für den Einsatz in dem zu entwickelnden Kommunikationssystem wurden folgende Funktechnologien gegenübergestellt und bewertet.

DECT

DECT ist ein ausgereifter Funkstandard, der geeignet ist für drahtlose, digitale, mikrozellulare Mobilfunknetze. Die Reichweite beträgt etwa 50 m in Gebäuden und bis zu 300 m im Freifeld. Es wird ein eigener Frequenzbereich von 1880 MHz bis 1900 MHz im reservierten Bereich von 1710 MHz bis 1930 MHz benutzt. Der Kanalabstand beträgt 1728 kHz, so dass 10 Frequenzkanäle bereitgestellt werden. Die maximal zulässige äquivalente Strahlungsleistung beträgt 4 W EIRP, die Sendeleistung 250 mW (invariant) und die gemittelte Sendeleistung beträgt 10 mW pro Zeitschlitz.

Es können bis zu 5 mobile Geräte (Mobile Parts) an einer Basisstation (Fixed Part) unter Verwendung einer Stern-Topologie betrieben werden. Ein Nachteil von DECT ist, dass der Verbindungsaufbau vom mobilen Gerät zur Basisstation erfolgt.

ZigBee

Die Markteinführung von ZigBee (IEEE 802.15.4) war im Anschluss an die 2005 beginnende Testphase für das Jahr 2007 geplant. Produkte waren jedoch bereits zu Beginn der Entwicklung des in dieser Arbeit behandelten Kommunikationssystems erhältlich [MAXSTREAM 2006, ZIGBEE-ALLIANCE 2004]. Der sogenannten *ZigBee Alliance* gehören unter anderen *Motorola* und *Samsung* an. ZigBee-Netzwerke sind hauptsächlich für den Einsatz in Sensornetzwerken mit geringer Auslastung und mit geringen Datenraten für Überwachungs- und Kontroll-Aufgaben in fast jedem Industriebereich einsetzbar. Die Reichweite von ZigBee beträgt gemäß des Standards und abhängig vom Einsatzbereich zwischen 10 und 75 m. Als Frequenzbereich wird international der 2,4 GHz-ISM-Bereich verwendet. In Europa kann zusätzlich noch der 868 MHz-Bereich verwendet werden.

Da ZigBee den gleichen Frequenzbereich wie WLAN benutzt und auch ein sehr ähnliches Modulationsverfahren DSSS verwendet, werden ZigBee-Netzwerke stark durch WLAN-Netzwerke beeinflusst, wodurch die Übertragungszuverlässigkeit sinkt. Als Topologie kann eine Punkt-zu-Punkt, Punkt-zu-Mehrpunkt, Teilnehmer-zu-Teilnehmer oder Maschen-Aufbau realisiert werden. Ein neuer Teilnehmer kann innerhalb von 30 ms erkannt und verbunden werden.

Der Vorteil von Zig-Bee-Anwendungen besteht in der Fähigkeit des schnellen Sendens der zu übertragenden Information, des Trennens und des Eintritts in einen Tief-schlafmodus, was sich in einer sehr geringen Energieaufnahme niederschlägt [ZIGBEE-ALLIANCE 2004]. Das Aufwecken eines Teilnehmers aus dem Schlafmodus dauert etwa 15 ms.

Die Firma *MaxStream* bietet eine erste Version von Modulen mit der Markenbezeichnung „XBee“ an, welche nach dem ZigBee-Standard IEEE 802.15.4 funktionieren. Die Module verwenden nur das 2,4 GHz-ISM-Band und stellen 16 Kanäle bereit [MAX-STREAM 2006]. Der Adressraum beträgt 16 Bit, d.h. pro Übertragungskanal können bis zu 65536 einmalige Teilnehmer angesprochen werden.

EnOcean

Die EnOcean-Technologie ist im Jahre 2002 eingeführt worden und ist z.B. für Sensoren gedacht, die die Sendeenergie selbst erzeugen, so dass die Datenkommunikation ohne externe Energieversorgung möglich ist. Die Firma *EnOcean* bietet Module für Datenübertragungen im 868,3 MHz-ISM-Band mit extrem geringen Energiebedarf an [ENOC-EAN 2007]. Die Produktbezeichnung ist „TCM 120“.

Die Übertragung der EnOcean-Module setzt sich zusammen aus dem Versand des Telegramms mit der Dauer von 1,2 ms in dreifacher Ausführung in zufälligen Zeitabständen innerhalb von 40 ms. Genutzt wird dabei das ALOHA-Protokoll (vgl. Abschnitt 6.3.3). Die Sendeleistung beträgt maximal 10 mW, wobei eine Reichweite bis 300 m unter Freifeldbedingungen erreicht werden kann. Die theoretisch erzielbare Datenübertragungsrate beträgt 9,6 kBit/s. Der Energiebedarf der Module beim Senden und Empfangen beträgt typisch $P_{\text{Betrieb}} = 150 \text{ mW}$. Im Standby-Betrieb wird eine Energie von $P_{\text{Ruhemodus}} = 200 \text{ }\mu\text{W}$ benötigt.

NanoNet

NanoNET-Module werden von der Firma *Nanotron Technologies GmbH* angeboten [NANOTRON TECHNOLOGIES 2006]. Die Reichweite beträgt bis zu 900 m bei einer Sendeleistung von 10 mW. Als Frequenzbereich wird der 2,45 GHz-ISM-Bereich genutzt. NanoNET-Module nutzen die sog. Chirp-Spread-Spectrum-Modulationsverfahren.

Bluetooth

Bluetooth (IEEE 802.15.1) wird seit ca. 1998/1999 für die Datenübertragung über kleine bis mittlere Distanzen zur Sprachübermittlung, Hausautomatisierung, industriellen Steuerung, für Sensor-Aktor-Netzwerke, Niedrigenergie-Anwendungen und Ad-hoc-Netzwerke im ISM-Band zwischen 2,402 GHz und 2,480 GHz eingesetzt. Die Reichweite von Bluetooth beträgt je nach Klasse zwischen 10 m bei 1 mW Sendeleistung (Klasse III), bis zu 50 m bei 2,5 mW Sendeleistung (Klasse II) und bis zu 100 m bei 100 mW

Sendeleistung (Klasse I).

Bluetooth setzt als Modulationsverfahren das Frequenzsprungverfahren FHSS (frequency hopping spread spectrum) ein. Nach jedem Empfangen und Senden wird bis zu 1600-mal pro Sekunde zufällig die Frequenz geändert.

Üblicherweise bilden Bluetooth-Module ein kleines Netzwerk, welches Piconetz genannt wird. In einem Piconetz können sich acht aktive Teilnehmer und bis zu 255 inaktive, d.h. geparkte Stationen befinden. Mindestens zwei aber höchstens 10 Piconetze können zu einem Scatternetz zusammengefasst werden. Damit können sich maximal 71 aktive Teilnehmer in einem Scatternetz befinden.

Folgende Angaben gelten für Bluetooth-Klasse-1-Geräte „BR-C30“ / „BR-CS30“ der Firma Blueradios [BLUERADIOS 2004]. Der Betriebstemperaturbereich liegt zwischen $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Versorgt werden die Module mit einer Gleichspannung von 3,3 V. Der Energiebedarf des Moduls beim Senden beträgt 396 mW und beim Empfangen 132mW. Die Module verfügen über zwei Energiesparmodi. Im Standby-Modus werden 6,6 mW, im Tiefschlaf-Modus 297 μW an Energie benötigt.

WLAN

Die WLAN-Technologie (IEEE 802.11b) wird seit 1997 für die Datenübertragung über mittlere bis große Distanzen im Haus, im Gesundheitswesen, Fabriken, Warenhäusern, Handel und Bildung und Forschung eingesetzt. Verwendet wird dafür das ISM-Band zwischen 2,400 GHz und 2,4835 GHz. In Deutschland werden 11 Kanäle mit einem Kanalabstand von 5 MHz bereit gestellt.

In anderen Ländern gelten andere Bestimmungen, so dass teils mehr, teils weniger Kanäle nutzbar sind. Die Reichweite beträgt bis zu 300 m. Es können Ad-hoc-Netzwerke mit zwei Teilnehmern und Client-Server-Netzwerke mit mehr als 100 Teilnehmern realisiert werden. Die Geräte müssen sich allerdings die Bandbreite eines Kanals teilen, wobei nur drei der 11 Kanäle überlappungsfrei sind.

WiMax

Die spezifizierte Reichweite der WiMax-Technologie beträgt 50 km, wobei der Frequenzbereich zwischen 2 und 11 GHz benutzt wird. Die theoretisch erreichbare Datenrate beträgt 70 MBit/s. Diese Technologie befindet sich derzeit noch in der Entwicklung und wird aufgrund der sehr großen Reichweite einen hohen Energiebedarf aufweisen.

UWB

Die Ultra-Breitband-Technologie nach dem Standard IEEE 802.15.3a (Ultra Wideband - UWB) befindet sich derzeit noch in der Entwicklungsphase. UWB ist für den Einsatz

im Endverbraucher-Bereich gedacht, z.B. als Ersatz von USB-Kabelverbindungen am Heim-Computer. Module dieser Technologie nutzen den Frequenzbereich von 3,1 GHz bis 10,6 GHz in 14 Bändern. Bedingt durch die große Bandbreite sind Datenraten von 100 bis 480 MBit/s erreichbar. Es sind 5 Kanäle nutzbar, von denen in der Regel nur ein Kanal genutzt wird und die verbleibenden vier optional nutzbar sind. Durch die hohen Frequenzen und der begrenzten Sendeleistung liegt die Reichweite von UWB bei weniger als 10 m [IHLENFELD 2004, ZIGBEE-ALLIANCE 2004]. Es sind nur Punkt-zu-Punkt-Verbindungen möglich.

6.4 Favorisierte Funkmodule

Als Vorgriff auf die Bewertung in Abschnitt 6.5 und zur Vermeidung einer Wiederholung werden die beiden favorisierten Funktechnologien und konkrete Produkte an dieser Stelle vorgestellt.

6.4.1 24XStream-Funkmodule der Firma *MaxStream*

Die 24XStream-Module sind kommerziell erhältliche Funk-Modems. Die Module der Firma *MaxStream* sind vorgesehen für transparente Operationen, d.h. den Ersatz einer seriellen Verbindung auf der Luftschnittstelle für Kontroll- und Überwachungsaufgaben in der Industrie und im Automotive-Bereich, in der Heimautomation, der Feldüberwachung und bei Telemetrie-Anwendungen [MAXSTREAM 2005]. Es können Punkt-zu-Punkt-, Punkt-zu-Mehrpunkt-, Multi-Drop-, Transparent- und Peer-to-Peer-Verbindungen realisiert werden.

Die X24Stream-Module nutzen 25 Kanäle im Frequenzbereich zwischen 2,4000 GHz und 2,4835 GHz mit sieben unabhängigen FHSS-FSK-Sequenzen (vgl. Abschnitt 6.3.2). Laut [MAXSTREAM 2005] lassen sich in Gebäuden und bei starker Bebauung Reichweite bis zu 183 m, und im Freien mit einer Dipolantenne bis 5 km erreichen. Durch Einsatz von Antennen mit hohem Gewinn sollen unter Freifeldbedingungen Reichweiten bis zu 16 km überbrückbar sein. Der Energiebedarf der Module liegt im Sendebetrieb bei $P_S = 750$ mW, im Empfangsbetrieb bei $P_E = 250$ mW und im Energiesparbetrieb bei weniger als $P_{Standby} = 130$ μ W.

Die Empfängerempfindlichkeit liegt bei -105 dBm bei Übertragungsrate von 9,6 kBit/s bzw. bei -102 dBm bei der Übertragungsrate von 19,2 kBit/s. Der Betriebstemperaturbereich der Industrie-Module liegt zwischen -40 °C und +85 °C.

6.4.2 XBee-PRO-Funkmodule der Firma *MaxStream*

Bereits in Abschnitt 6.3.5 wurde die ZigBee-Funktechnologie anhand von Testmodulen der Firma *MaxStream* vorgestellt [MAXSTREAM 2006].

Die Firma *MaxStream* bewirbt die unter dem Markennamen „XBee-PRO“ angebotenen Funkmodule mit einer im Vergleich zu den normalen XBee-Modulen größeren Reichweite. Dies wird durch eine um den Faktor 100 höhere Sendeleistung von bis zu 100 mW (20 dBm) sowie eine große Empfangsempfindlichkeit von -100 dBm erzielt. Unter Freifeldbedingungen soll eine Distanz von bis zu 1,6 km mit Dipolantennen überbrückt werden können.

Die funktionalen Eigenschaften der XBee-PRO-Module entsprechen denen der ZigBee-Technologie in Abschnitt 6.3.5.

6.5 Bewertung der Funktechnologien

Mit Hilfe der Methode des *Paarweisen Vergleichs* wurden die Funktechnologien in Form konkreter Hardwaremodule anhand der klassifizierten und dekomponierten Anforderungen an die Kommunikationshardware entsprechend Abschnitt 3.3.2 bewertet und eine Rangreihe erstellt. Die Priorisierung der relevanten Anforderungen für die Kommunikationshardware mit der Methode des *Paarweisen Vergleichs* ist in Abbildung 6.7 dargestellt. Die Bewertung der möglichen Funktechnologien ist in Abbildung 6.8 dargestellt..

		Anbieter	Anschaffungspreis	Betriebskosten	Datenkanal, Datenrate	HF-Kanal, Funkreichweite	HF-Kanal, Frequenzbereich	HF-Kanal, Anzahl der Teilnehmer	RAM(S)	Montage	Reihung	Umweltbedingungen	Energie, Bedarf & Toleranz	ESD, Festigkeit	Technologische Einsetzbarkeit, Topologie	Technologische Einsetzbarkeit, Organisation	Kundenpräferenz	Zellensumme	Priorisierung [%]	Rang
Verfügbarkeit	Anbieter		2	2	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	28	11,67	1
	Anschaffungspreis	0		1	1	0	2	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	11	4,58	9
	Betriebskosten	0	1		0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0,83	12
Datenkanal	Datenrate	0	1	2		0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	8	3,33	11
HF-Kanal	Funkreichweite	2	2	2	2		2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	24	10,00	2
	Frequenzbereich	0	0	2	1	0		0	0	0	0	1	2	2	1	0	1	10	4,17	10
	Anzahl der Teilnehmer	0	2	2	2	0	2		0	1	1	1	0	1	1	1	2	16	6,67	6
RAMS(S)		0	2	2	1	1	2	2		2	2	2	1	1	1	2	2	23	9,58	3
Funkhardware	Montage	0	1	2	2	1	2	1	0		0	0	1	0	1	1	1	13	5,42	8
	Reihung	0	1	2	1	1	2	1	0	2		1	0	0	1	1	1	14	5,83	7
	Klima, Verschmutzung, Feuchtigkeit, EMV	0	1	2	2	1	1	1	0	2	1		2	1	1	2	0	17	7,08	5
Energie	Bedarf & Toleranz	0	1	2	2	1	0	2	1	1	2	0		0	1	2	1	16	6,67	6
ESD	Festigkeit	0	1	1	2	1	0	1	1	2	2	1	2		2	2	2	20	8,33	4
Einsetzbarkeit	Topologie	0	1	2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0		1	2	14	5,83	7
	Organisation	0	1	2	1	0	2	1	0	1	1	0	0	0	1		1	11	4,58	9
Kundenpräferenz		0	2	2	2	0	1	0	0	1	1	2	1	0	0	1		13	5,42	8

240 100

Abbildung 6.7: Priorisierung der Eigenschaften möglicher Funktechnologien nach der Bewertungsmethode des Paarweisen Vergleichs

			Priorität [%]	RF-Modem im 2,4 GHz-/ISM-Band MaxStream	RF-Modem Aerocomm AC 4424-100	XBee PRO (IEEE 802.15.4) MaxStream	XBee (IEEE 802.15.4) (MaxStream)	EuroOcean Transceiver Modul TCM 120	DECT	NanoNET	Bluetooth Klasse 1 BR-C30 / BR-SC30	WLAN (IEEE 802.11b)	WiMax (IEEE 802.16d (früher a))	UWB (Wireless USB) (derzeit IEEE 802.15.3a)
Hardware	Verfügbarkeit	Anbieter	11,67	2	2	1	1	2	2	1	2	2	0	0
		Anschaffungspreis	4,58	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0
		Betriebskosten	0,83	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Systemanforderungen	Datenkanal	Datenrate	3,33	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
		Funkreichweite	10,00	2	2	2	0	0	0	2	0	0	2	0
	HF-Kanal	Frequenzbereich	4,17	2	2	2	2	1	2	2	2	2	0	0
		Anzahl der Teilnehmer	6,67	2	2	2	2	2	1	0	0	2	0	0
	RAMS(S)		9,58	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Geometrische Anforderungen	Funkhardware	Montage	5,42	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0
		Reihung	5,83	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0
Umweltbedingungen		Klima, Verschmutzung, Feuchtigkeit, EMV	7,08	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2
Elektrische Anforderungen	Energie	Bedarf & Toleranz	6,67	2	2	2	2	2	1	2	2	0	0	0
	ESD	Festigkeit	8,33	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0
Technologie	Einsetzbarkeit	Topologie	5,83	2	2	1	1	0	1	1	0	0	0	0
		Organisation	4,58	2	2	2	2	0	1	1	2	2	0	0
	Kundenpräferenz		5,42	2	1	2	2	2	2	0	0	1	0	0
			100											
Gewichtete Bewertungspunktzahl			185,8	180,4	168,3	148,3	140,8	135,0	135,0	130,0	128,3	0	0	
Rang			1.	2.	3.	4.	5.	6.	6.	7.	8.	-	-	

Abbildung 6.8: Bewertungsmatrix möglicher Funktechnologien

Anhand der Bewertung wurden Funk-Modems für das 2,4-GHz-ISM-Band der Firma *MaxStream* sowie solche eines zweiten Herstellers *Aerocomm* auf den ersten beiden Rangplätzen platziert, gefolgt von XBee-PRO-Modulen der Firma *MaxStream* auf dem 3. Platz.

RF-Modems haben einen höheren Energiebedarf als ZigBee-PRO-Module. Eine abschließende Auswahl anhand der Datenblätter ist nicht abschließend möglich. Bedingt durch die äußeren Randbedingungen des Projekts war nur jeweils ein Vertreter einer Funktechnologie zugelassen. Die Eigenschaften der RF-Modems der beiden Hersteller *MaxStream* und *Aerocomm* sind sehr ähnlich, so dass bedingt durch die vom Hersteller angegebene größere Sendereichweite und des etwas geringeren Energiebedarfs (vgl. Abbildung 6.6) die 24X-Stream-Module des Herstellers *MaxStream* ausgewählt wurden.

Für die Validierung der Herstellerangaben bezüglich der Funkeigenschaften in Freifeldversuchen und im Bahnumfeld wurde daher die Komponenten des jeweiligen Demonstrations-Sets für die 24XStream- und die XBee-PRO-Module des Herstellers *MaxStream* verwendet.

6.6 Ermittlung und Validierung der Funkeigenschaften

Die Herstellerangaben bezüglich der erzielbaren Funkreichweiten wurden in mehreren Versuchen und unter unterschiedlichen Bedingungen ermittelt. Um einen Überblick über die Eigenschaften der Funkmodule zu erhalten, wurden zunächst Messungen unter Freifeldausbreitungsbedingungen durchgeführt (vgl. Abschnitt 6.6.1). Anschließend wurden Messungen unter Nicht-Freifeldbedingungen wiederholt und abschließend im Bahnumfeld validiert (vgl. Abschnitt 6.6.2).

Beide zu untersuchenden Technologien nutzen das 2,4 GHz-ISM-Band. Der Hersteller *MaxStream* gibt für die XBee-PRO-Module eine maximale Reichweite von ca. 1,6 km (1 Meile) und für die 24XStream-Module eine Reichweite von bis zu 5 km (3 Meilen) unter Verwendung von Dipolantennen an. Die eingesetzten Module sind Bestandteile der jeweiligen „Technology Development Kits“.

6.6.1 Funkeigenschaften im Freifeld

Zur Validierung der erzielbaren Funkreichweiten wird mittels der Komponenten der Demonstrations-Packs von der Firma *MaxStream* eine Versuchsanordnung entsprechend Abbildung 6.9 realisiert. Dazu wird der Abstand zwischen den beiden Funkmodulen während der Messungen variiert. Als Ergebnis eines Versuchsdurchgangs ergeben sich die Empfangsfeldstärke sowie der prozentuale Paketverlust in Abhängigkeit von dem Abstand zwischen den Modulen bzw. deren Dipolantennen.

Für die Ermittlung der Empfangsfeldstärke sowie des Paketverlustes werden pro Messung mittels des Programms der Firma *MaxStream* auf einem tragbaren Computer zyklisch Telegramme mit Zufallsdaten sowie mit variabler Länge in zeitäquidistanten Abständen generiert und seriell an das erste Funkmodul ausgegeben. Dieses sendet die Daten über die Funkschnittstelle an das zweite Funkmodul, welches die empfangenen Telegramme unmittelbar zurücksendet. Nach Empfang der Rücknachricht wird diese auf Korrektheit geprüft und der Empfangspegel (RSSI) des ersten Funkmoduls ermittelt.

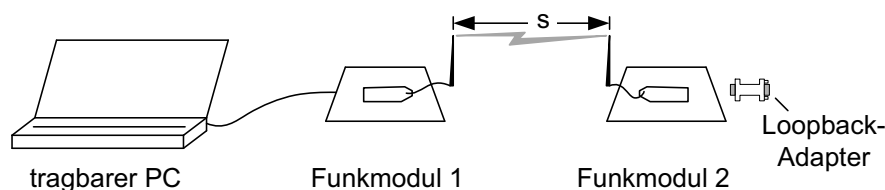


Abbildung 6.9: Versuchsanordnung zur Reichweitenvalidierung entsprechend des MaxStream-Development-Kits

Messumgebung 1 und Ergebnisse

Die erste Messumgebung befand sich an einem Feld mit einer dreieckigen Grundfläche und einer Kantenlänge von ca. 1 km bei der Ortschaft Flechtorf. Das Feld war überspannt mit Hochspannungsleitungen. Es wurden dort die XBee-PRO- und die 24XStream-Module unter Freifeldbedingungen untersucht (vgl. Abbildungen 6.10 und 6.11).



Abbildung 6.10: Skizze der Messumgebung 1

Die XBee-PRO-Module wurden mit einer Sendeleistung von 10 mW (10 dBm) betrieben und untersucht. Sie erreichten nicht die erforderliche Mindestfunkreichweite von 750 m. Bei einer Entfernung zwischen den Funkmodulen von 460 m brach die Kommunikation komplett ein, d.h. der Paketverlust betrug 100%. Die in Messumgebung 1 für die XBee-PRO-Module ermittelten Ergebnisse sind in Abbildung 6.12 dargestellt.

Die Messdaten für die 24XStream-Module wurden in zwei Messdurchläufen *A* und *B* ermittelt. Pro Messpunkt wurden zwei Messungen zu je 100 Telegrammen durchgeführt. Die Sendeleistung betrug 50 mW (17 dBm).

Die Funkverbindung zwischen den 24XStream-Modulen riss in dieser Messumgebung bis zu der Mindestentfernung und darüber hinaus nicht ab. Die für die 24XStream-Module ermittelten Ergebnisse in Messumgebung 1 sind für den Messdurchlauf *A* in Abbildung 6.13 und für den Messdurchlauf *B* in Abbildung 6.14 dargestellt. Die Er-



Abbildung 6.11: Messumgebung 1 in Flechtorf

gebnisse sind in Tabelle 6.3 zusammengefasst.

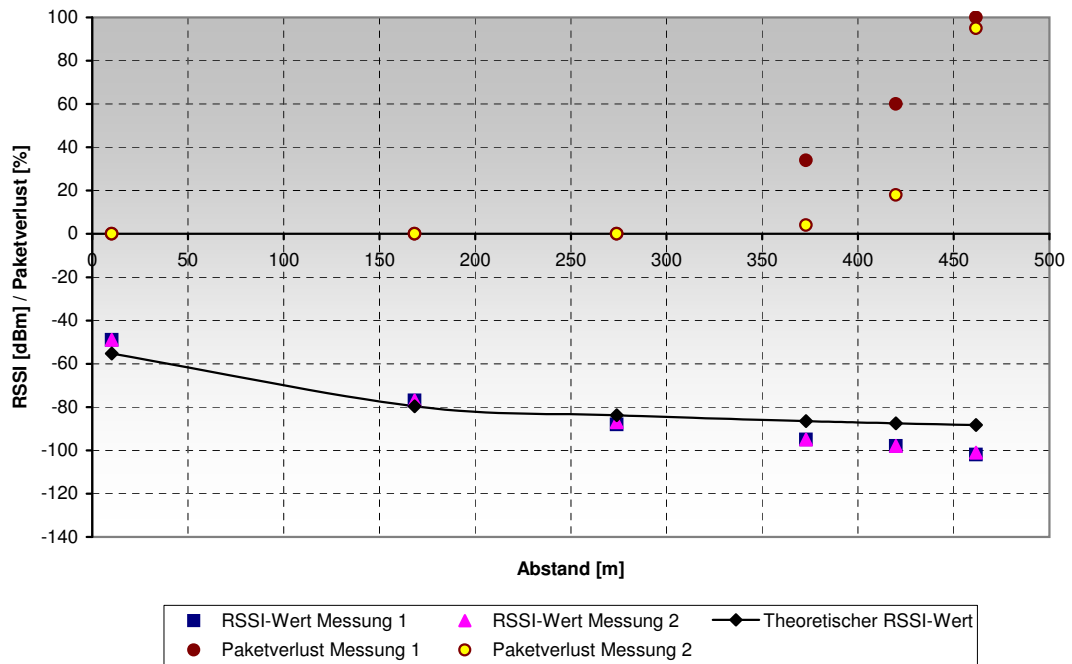


Abbildung 6.12: Messergebnisse für die XBee-PRO-Module in Messumgebung 1

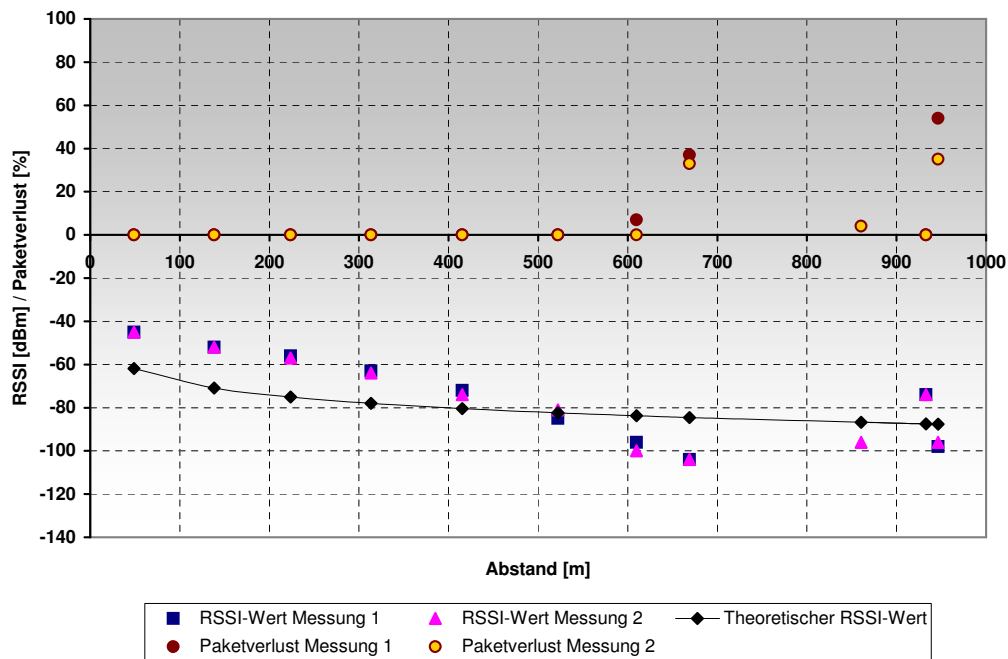


Abbildung 6.13: Messergebnisse für Messdurchlauf A der 24XStream-Module in Messumgebung 1

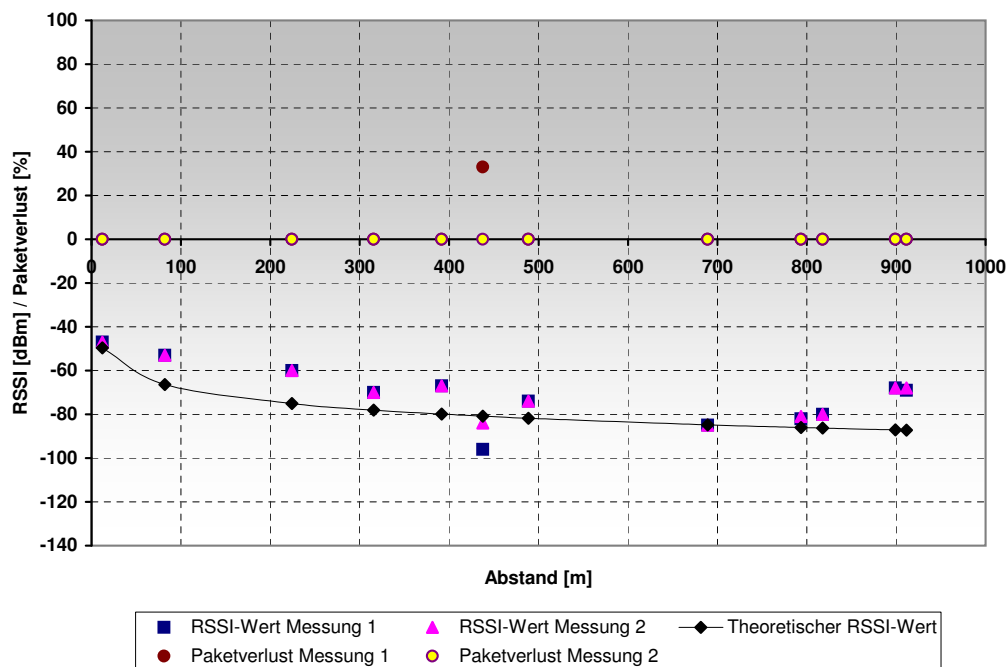


Abbildung 6.14: Messergebnisse für Messdurchlauf B der 24XStream-Module in Messumgebung 1

Modul	Sendeleistung	maximale Reichweite
XBee-PRO	10 dBm (10 mW)	< 350 m
24XStream A	17 dBm (50 mW)	ca. 900 m
24XStream B	17 dBm (50 mW)	ca. 900 m

Tabelle 6.3: Validierungsergebnisse in Messumgebung 1

Messumgebung 2 und Ergebnisse

Das Ergebnis der Freifeldmessungen in der ersten Messumgebung hat gezeigt, dass die XBee-PRO-Module nicht den Anforderungen bezüglich der Funkreichweite gerecht werden.

Um die Funkeigenschaften der 24XStream-Module insbesondere unter Nicht-Freifeld-Bedingungen besser beurteilen zu können, wurden die Funkreichweitenmessungen entlang eines Wirtschaftsweges in der Nähe der Ortschaft Cremlingen wiederholt (vgl. Abbildung 6.15). Die Messstrecke war auf der einen Seite etwa bis zur Hälfte als Allee mit dichtem Blattwerk und Bewuchs links und rechts der Strecke ausgebildet (vgl. Abbildung 6.16). Sie war ca. 900 m lang und wies bei ca. 450 m einen Hügel aus, so dass die Sichtverbindungen nicht über die komplette Distanz vorhanden waren (vgl. Abbildung 6.17) .

Pro Messpunkt wurden vier Messungen durchgeführt. Die 24XStream-Module werden mit einer maximalen Sendeleistung von 50 mW (17 dBm) betrieben. Die ermittelten Verläufe des Empfangspegels und des prozentualen Paketverlust an Funkmodul 1 in Messumgebung 2 sind in Abbildung 6.18 dargestellt. Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Tabelle 6.4 zusammengefasst.

Modul	Sendeleistung	maximale Reichweite
24XStream	17 dBm (50 mW)	ca. 899 m

Tabelle 6.4: Ergebnis für die 24XStream-Module in Messumgebung 2



Abbildung 6.15: Skizze der Messumgebung 2



Abbildung 6.16: Teil 1 der Messumgebung 2 in Cremlingen



Abbildung 6.17: Teil 2 der Messumgebung 2 in Cremlingen

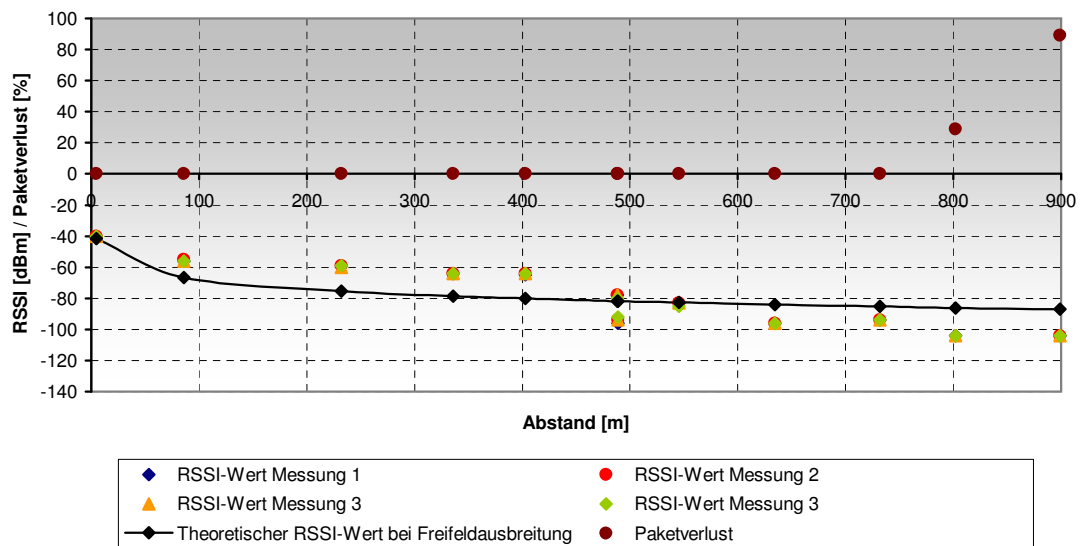


Abbildung 6.18: Messergebnisse für die 24XStream-Module in Messumgebung 2

6.6.2 Funkeigenschaften im Bahnumfeld

Nach Ermittlung der positiven Messergebnisse (vgl. Abschnitt 6.6.1) wurden die 24X-Stream-Module unter den Bedingungen des Bahnbetriebs während der Betriebsruhe betrieben und Ergebnisse bezüglich der Funkreichweite in dem Umfeld ermittelt. Die Messungen wurden in der Richtungsgruppe des Güterbahnhofs Braunschweig durchgeführt. Dafür wurden eigens Schadwagen unterschiedlichen Typs, d.h. Flach- und Schiebewandwagen, mit einer Gesamtlänge von ca. 500 m in einem ebenso langen Abstell-

gleis in einer leichten Rechtskurve abgestellt. Im Nebengleis der Schadwagen wurden Schiebewandwagen und zwei Elektrolokomotiven abgestellt. Aufgrund des gebogenen Gleisverlaufs und der Anordnung der Elektrolokomotiven direkt zu Beginn der Messstrecke war der Großteil der Gleise durch die Lokomotiven abgeschattet, d.h. es war keine Sichtverbindung vorhanden (vgl. Abbildung 6.19).



Abbildung 6.19: Messumgebung 3 im Güterbahnhof Braunschweig

Im Gegensatz zu dem Versuchsaufbau in Abschnitt 6.6.1 wurde das Funkmodul 2 in Kombination mit einem Mikrocontroller und einem GPS-Satellitennavigationsempfänger betrieben. Die genannten Komponenten waren wetterfest in einem Gehäuse angeordnet, was im folgenden als Kommunikationsgerät 2 bezeichnet wird.

Der Abstand zwischen Funkmodul 1 und Kommunikationsgerät 2 wurde durch Variierung der Position des Kommunikationsgeräts 2 verändert und so die Empfangsfeldstärke von Hin- und Rückrichtung (RSSI) über dem Abstand im Bereich zwischen 0 m und 500 m ermittelt. Das Kommunikationsgerät 2 wurde während der Messung zum einen etwa auf halber Länge seitlich an jedem Wagen und zum anderen am Ende jedes Wagens im Bereich der Puffer mittels starker Magnete provisorisch befestigt. Der Abstand wurde aus den Positionsinformationen des ortsfesten Funkmoduls 1 sowie des ortsveränderlichen Kommunikationsmoduls 2 berechnet.

Pro Messpunkt wurde 10 mal händisch ein Telegramm von dem tragbaren PC über das Funkmodul 1 an das Kommunikationsgerät 2 gesendet. Dieses bestimmte daraufhin mittels des GPS-Satellitennavigationsempfängers die aktuelle Position sowie die

Empfangsfeldstärke (RSSI) auf der Übertragungsstrecke zwischen dem Funkmodul 1 und dem Kommunikationsgerät 2. Diese Informationen sendete das Kommunikationsgerät 2 zusammen mit der aktuellen Zeitinformation des Kommunikationsgeräts 2 (Zeitstempel) zurück an das Funkmodul 1 und damit an den tragbaren Computer. Dieser speicherte die empfangenen Daten für die spätere Auswertung in einer Datei.

Die Darstellung der *RSSI*-Werte und des Paketverlustes über dem Abstand gibt Aufschluss über die Qualität und Zuverlässigkeit der Funkverbindung.

Ergebnisse der Messungen im Bahnumfeld

Die Messungen wurden unter widrigen Umweltbedingen bei Temperaturen um 5°C und feuchter Witterung durchgeführt. Eine Funkkommunikation konnte dabei trotz nicht vorhandener Sichtverbindung bis zu einer Entfernung zwischen dem Funkmodul 1 und dem Kommunikationsgerät 2 von 500 m nachgewiesen werden. Eine Sichtverbindung war nur bis ca. 70 m Entfernung vorhanden, danach erfolgte eine Abschattung durch zwei Elektrolokomotiven im Nachbargleis. Durch Überspannungen mit Oberleitungen sowie massive Schiebewandwagen in beiden Gleisen waren ebenfalls Beeinträchtigungen auf die Funkausbreitung zu erwarten (Abschattung, (Mehrfach-) Reflexion, Beugung, usw.) (vgl. Abschnitt 6.1.3). Die Messung für größere Entfernungen war aufgrund der örtlichen Gegebenheiten nicht möglich. Die ermittelten Messergebnisse sind in Abbildung 6.20 dargestellt. Der durchschnittliche prozentuale Paketverlust wurde mit 0,86 % ermittelt.

Auf Basis dieser Messergebnisse werden die 24XStream-Module für die weitere Nutzung als geeignet bewertet. Eine Beurteilung der 24XStream-Module für größere Funkreichweiten im Bahnumfeld wurde bisher nicht durchgeführt.

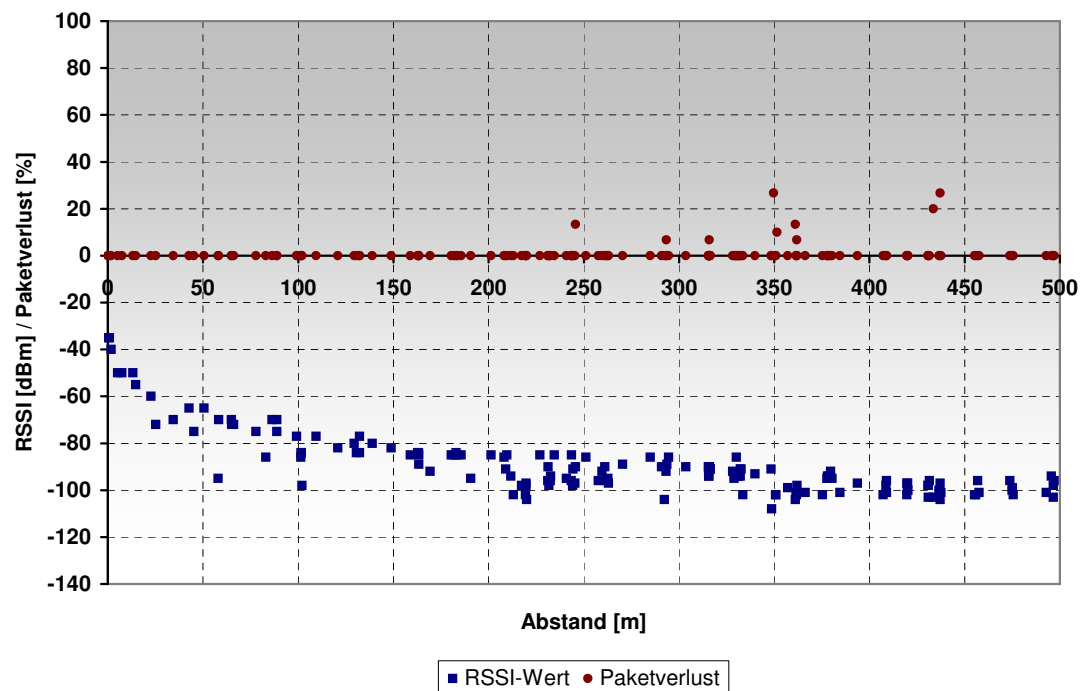


Abbildung 6.20: Messergebnisse für die 24XStream-Module im Bahnumfeld

6.6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das Ergebnis der Validationsversuche lässt sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die XBee-PRO-Module erreichen die in den Anforderungen festgelegte Funkreichweite nicht (vgl. Abschnitt 6.2).
2. Die 24XStream-Module zeigten in den ersten Versuchsumgebungen sporadische Pegelbrüche und Paketverluste. Eine Fehlererkennung oder -korrektur kam noch nicht zum Einsatz.
3. Unter idealen Freifeldbedingungen erzielten die 24XStream-Module nachweislich ungestörte Verbindungen mit geringem Paketverlust bis zu einer Entfernung von 963 m. Entfernungen von mehr als 963 m wurden messtechnisch jedoch nicht mehr erfasst.
4. Die 24XStream-Module konnten im Bahnumfeld trotz widriger Umwelteinflüsse und betriebstechnisch anspruchsvoller Randbedingungen ohne Sichtverbindung und unter Verwendung von Dipolantennen eine Distanz von 500 m ungestört überbrücken. Die 24XStream-Module entsprechen damit den Anforderungen bezüglich der Funkreichweite nicht in vollem Umfang, allerdings könnten Antennen mit Richtwirkung die Reichweite weiter erhöhen. Die Versuche wurden jedoch nicht durchgeführt.

Die Empfehlung auf Basis der Validationsergebnisse lautet daher, die 24XStream-Funkmodule für den Einsatz in dem zu realisierenden Funkbus falls möglich mit Antennen mit Richtwirkung zu verwenden.

6.7 Auswahl der Topologie der Kommunikationsstruktur

In Abschnitt 6.1.2 wurden bereits drei funktionale Topologien vorgestellt. An dieser Stelle soll die für das zu entwickelnde Kommunikationssystem einzusetzende Topologie ausgewählt werden.

Der Einsatz einer Baum-Topologie mit Funkzellenbildung und ggf. redundanten Verbindungen bietet auf den ersten Blick viele Vorteile, jedoch sind dem die Anforderung an das zu realisierende Kommunikationssystem nach einem minimalen Energiebedarf sowie nach ereignisdiskreter Kommunikation im Fehlerfall entgegenzuhalten.

Dies gilt ebenso für die Bus-Topologie (vgl. Abschnitt 6.1.2).

Funkzellen erfordern einen Funkzellenkoordinator, der im schlechtesten Fall permanent aktiv sein muss, was sich wiederum negativ auf den Energiebedarf auswirkt (vgl. Abschnitt 5.2). Aufgrund des nicht vorher definierten Busaufbaus und der Rolle jedes Kommunikationspartners, muss prinzipiell jedes Kommunikationsgerät eines Fahrverbands in der Lage sein, die Rolle des Funkzellenkoordinators zu übernehmen und somit bis zu sechs Jahre ununterbrochen aktiv sein.

Aufgrund der Anforderungen nach überschaubaren Investitions- und Wartungskosten ist eine Energieversorgung mit dem besten Kosten-Nutzen-Verhältnis zu realisieren, so dass die Nutzung einer Baum-Topologie durch Bildung von Funkzellen ausgeschlossen ist. Die Entwicklung bisher fehlender Telegramm-Weiterleitungs-Algorithmen (Routing) ist daher für die weitere Entwicklung in dieser Arbeit nicht notwendig.

Aus der pragmatischen Bewertung der funktionalen Topologien hinsichtlich der daraus resultierenden Auswirkungen auf die Anforderungen an die Energieversorgung und an die Kommunikation resultiert die Auswahl der Stern-Topologie.

6.8 Sichere Kommunikation

Eine sichere Kommunikation ist abhängig von der Resistenz gegenüber den Bedrohungen, welche auf die Bitübertragungs- und die Sicherungsschicht entsprechend des ISO-OSI-Referenzmodells (vgl. Abschnitt 6.1.1) wirken. [EN50159-2 2002] nennt und spezifiziert diese Bedrohungen für eine Datenübertragung in offenen Übertragungs-

systemen, wie der Funkkommunikation, im Hinblick auf die Grundanforderungen zur Wahrung der Informationssicherheit. Die Grundanforderungen sind folgend kurz aufgezählt:

- *Verfügbarkeit (availability)*
Verfügbarkeit ist die Eigenschaft, berechtigten Nutzern bei Bedarf im Rahmen der Spezifikationen zugänglich und nutzbar zu sein.
- *Vertraulichkeit (confidentiality)*
Vertraulichkeit ist die Eigenschaft, dass Daten oder der darin enthaltenen Informationen nur für berechtigte Nutzer zugänglich sind.
- *Integrität (integrity)*
Integrität ist die Eigenschaft, dass es einem nicht berechtigten Teilnehmer unmöglich ist, Daten unbemerkt zu erzeugen, zu verändern, zu ersetzen oder zu löschen.
- *Authentizität (authentication)*
Benutzerauthentizität bezeichnet, dass ein Nutzer wirklich derjenige ist, für den er sich ausgibt. Die Datenauthentizität bezeichnet die Gültigkeit der Daten bezüglich Sender und Empfänger sowie Veränderungen.
- *Nichtabstreitbarkeit (non-repudiation)*
Nichtabstreitbarkeit ist die Eigenschaft, dass das Automatisierungssystem im Nachhinein in der Lage ist, den Urheber einer Handlung beweisbar zu benennen.

6.8.1 Bedrohungen

Die in [EN50159-1 2003] und [EN50159-2 2002] identifizierten Bedrohungen für die Kommunikation innerhalb eines Kommunikationssystems werden folgend benannt.

Bedrohung durch Wiederholungen von Nachrichten

Wird eine Nachricht mit dem selben Informationsgehalt von einem Angreifer kopiert oder wird eine Nachricht durch einen Fehler eines Kommunikationsgeräts kopiert und in eine Situation eingespielt, wo sie dem Empfänger schaden könnte, so besteht die Gefahr, dass veraltete Informationen übertragen und innerhalb des technischen Systems verwendet werden.

Bedrohung durch Auslassungen von Nachrichten oder Informationen

Wird eine Nachricht durch einen Angreifer entfernt oder durch eine Fehlfunktion eines Kommunikationsgeräts ausgelassen, so kann dies zu einer Fehlfunktion des technischen Systems führen.

Bedrohung durch Einfügungen von Nachrichten

Wird von einem Angreifer absichtlich oder von einem autorisierten dritten Kommunikationsteilnehmer unabsichtlich eine Nachricht in den Informationsfluss eingefügt, so hat dies potentiell eine Fehlfunktion oder den Ausfall des technischen Systems zur Folge.

Bedrohung durch Resequenzierungen von Nachrichten

Ändert ein Angreifer absichtlich die Folge oder den Übertragungsweg von Nachrichten an den Empfänger eines Kommunikationssystems oder wird wegen einer Hardwarefehlfunktion die Nachrichtenreihenfolge geändert, so kann dies zu einer bedrohlichen Situation innerhalb des dem Kommunikationssystem überlagerten technischen Systems führen.

Bedrohung durch Verfälschungen von Nachrichten

Wird eine Nachricht, z.B. durch EMV, zufällig in eine andere, formal korrekte Nachricht verändert oder verändert ein Angreifer eine Nachricht in einer plausiblen Weise, so dass der Sender und der Empfänger des Kommunikationssystems diese Modifikation nicht entdecken können, so stellt dies eine Bedrohung für das dem Kommunikationssystem überlagerte technische System dar.

Bedrohung durch Verzögerungen von Nachrichten

Zu einer Verzögerung von Nachrichten kann es durch eine Überlastung des Übertragungssystems kommen. Dies kann zum einen durch fehlerhaft dimensionierte oder zufällig zu hohe Verkehrslast und zum anderen durch eine von einem Angreifer durch Scheinnachrichten provozierte Überlastung (Denial-of-Service-Angriff) hervorgerufen werden.

Bedrohung durch Manipulationen von Nachrichten

Die Kommunikation zwischen einem Sender und einem Empfänger kann durch zwei Arten manipuliert werden. Ein Angreifer kann sich gegenüber dem Empfänger als Sender ausgeben um Zugriff auf die sensiblen Daten zu erlangen oder um als legaler Nutzer des Systems betrachtet zu werden.

Durch einen Netzwerkfehler kann der Empfänger des Kommunikationssystems 1 fälschlicherweise glauben, dass die Nachricht vom Sender des Kommunikationssystems 1 kommt, obwohl der wirkliche Sender der des Kommunikationssystems 2 ist.

6.8.2 Schutzmaßnahmen zur Sicherung der Übertragung

Im Folgenden werden die entsprechend [EN50159-2 2002] einsetzbaren Schutzmaßnahmen gegen die in Abschnitt 6.8.1 benannten Bedrohungen genannt.

Nummerierung der Nachrichten

Unter der Nummerierung der Nachrichten (sequence numbering) wird das Hinzufügen einer durchlaufenden Nummer zu jeder Nachricht verstanden. Dadurch kann ein Verlust und die Reihenfolge detektiert werden. Dazu sind die Länge der Sequenznummer (meist 8 Bit), der Initialwert (meist 0) sowie die Fehlerbehandlung bei Verlust oder Nichteinhaltung der Reihenfolge zu definieren.

Zeitstempelung der Nachrichten

Der Informationsgehalt einer Nachricht ist oft zeitbezogen, d.h. eine veraltete Information ist möglicherweise unbrauchbar. Für die Anwendung der Zeitstempelung bei der Aussendung ist der Wert und die Genauigkeit eines Zeitinkrements, die Größe des Zählers, die Zeitbasis sowie die Synchronisation und Zeitverzögerungen durch Nachrichtenbehandlung zu berücksichtigen.

Gültigkeitsbeschränkung für die Nachrichten

Während einer Datenübertragung kann der Empfänger die Zeitdifferenz zwischen zwei Nachrichten detektieren. Überschreitet die Empfangsverzögerung der Bestätigungsnachricht des Empfängers einen vorher definierten Zeitbereich, so gilt ein Telegramm als nicht empfangen und wird mit einer Fehlerreaktion seitens des Senders behandelt. Dazu ist eine angemessene zulässige und vom Einsatzzweck abhängige Verzögerung zwischen dem Senden des Nachrichtentelegramms und dem Empfang der Bestätigungsnachricht zu definieren, z.B. einige Millisekunden. In Kombination mit einer bidirektionalen Verbindung und Realisierung eines Rückkanals mit Nachrichtenbestätigung (Acknowledge) kann die Überwachung vom Sender erfolgen.

Nachrichtenbestätigung (Acknowledge)

Ist ein bidirektionaler Übertragungskanal zwischen Sender und Empfänger vorhanden, so kann der Empfänger eine Bestätigungsnachricht zurück an den Sender schicken. Es wird zwischen Schiebefensterstechnik (sliding window) und Senden-und-Warten-Technik (Send-and-wait) unterschieden. Bei der Senden-und-Warten-Technik sendet der Sender eine Nachricht und wartet mit dem Senden der nächsten Nachricht so lange, bis der Empfänger den Empfang bestätigt hat. Bei der Schiebefensterstechnik werden zunächst mehrere Datenpakete übertragen, bevor auf eine Bestätigung des Empfängers gewartet wird. Die Fenstergröße wird durch das Protokoll festgelegt und richtet sich u.a. nach dem Datendurchsatz zwischen Sender und Empfänger.

Quell- und Zielbezeichner

Zur Verifikation der empfangenen Daten kann eine Nachricht die eindeutige Kennung des Senders, des Empfängers oder beider enthalten. Dazu ist die Größe des Identifika-

tionsfeldes festzulegen.

Fehlersicherungsmechanismen

In einem offenen Übertragungssystem werden Übertragungs-codes benutzt, um Bitfehler und/oder Burstfehler zu detektieren und ggf. um die Übertragungsqualität durch Fehlerkorrekturmechanismen zu verbessern. Um beschädigte Nachrichten zu erkennen oder zu korrigieren ist ein zusätzlicher Sicherheitscode unter der Kontrolle des sicherheitsrelevanten Prozesses nötig. Dazu werden oft Prüfsummen zyklischer Codes (Hashfunktionen) eingesetzt, z.B. der Cyclic Redundancy Check (CRC). In einem technischen System, bei dessen Datenübertragung keine Einflussnahme durch Bestätigung oder manuelle Korrektur eines erkannten Übertragungsfehlers gewollt oder möglich ist, wird der Einsatz fehlerkorrigierender Codes gefordert.

Die Ergänzung der Nutzdaten durch eine Prüfsumme ist jedoch nicht hinreichend um eine Vorwärtsfehlerkorrektur zu ermöglichen. Eine Vorwärtsfehlerkorrektur wird durch eine fehlerkorrigierende Codierung ermöglicht z.B. durch lineare, zyklische Blockcodes.

Kryptographische Verfahren

Können boshafte Angriffe auf das System, gerade bei der Nutzung einer Funkkommunikation, von außen nicht ausgeschlossen werden, so können diese durch Verschlüsselungstechniken aufgedeckt werden. Verschlüsselungstechniken implizieren die Verwendung von Schlüsseln und Algorithmen. Der Grad der Effektivität hängt von der Stärke der verwendeten Algorithmen und der Geheimhaltung der verwendeten Schlüssel durch dem Einsatzzweck entsprechende Auswahl einer geeigneten Schlüssellänge und eines geeigneten Schlüsselmanagements ab.

6.8.3 Auswahl der Sicherungsmaßnahmen und der Nachrichtenstruktur

Die [EN50159-2 2002] stellt eine Bedrohungs-/Schutzmaßnahmenmatrix zur Verfügung, welche in Abbildung 6.21 dargestellt ist. Anhand des Entscheidungsbaums in Abbildung 6.22 ist eine Nachrichtenstruktur auszuwählen [EN50159-2 2002].

Gerade bei einer Datenübertragung per Funk kann ein nichtautorisierter Zugriff nicht ausgeschlossen werden, so dass für den späteren Einsatz entsprechend [EN50159-2 2002] kryptographische Techniken mit geheimen Schlüsseln verwendet werden müssen.

	Schutzmaßnahme							
	Sequenznummer	Zeitstempel	Zeitüberwachung	Quellen- & Zielbezeichner	Rücknachricht	Identifikationsprozedur	Sicherheitscode	Kryptografische Techniken
Bedrohung								
Wiederholung	X	X						
Auslassung	X							
Einfügung	X			X	X	X		
Resequenzierung	X	X						
Verfälschung							X	X
Verzögerung		X	X					
Manipulation					X	X		X

Abbildung 6.21: Bedrohungs-Schutzmaßnahmenmatrix nach [EN50159-2 2002]

Nach Entscheidung des Auftraggebers soll in der prototypischen Realisierung jedoch kein kryptographischer Sicherheitscode verwendet werden, so dass explizit keine Nachrichtenstruktur nach *B0* bzw. *B1* eingesetzt werden soll, sondern vielmehr eine Struktur entsprechend *A0* (vgl. Abbildung 6.23). Die Begründung hierfür ist, dass durch Mithören der gesendeten Nutzdaten kein Wettbewerbsvorteil für ein Konkurrenzunternehmen entstünde.

Für die spätere Evolution des Kommunikationssystems kann entweder der Nachrichtentyp *A1* mit kryptographischem Sicherheitscode oder *B1* mit nichtkryptographischem Sicherheitscode und kryptographischem Codeanhang adaptiert werden, wobei sich die Erweiterung der Nachrichtenstruktur *A0* durch einen kryptographischen Sicherheitscode anbietet. Dadurch resultiert die Nachrichtenstruktur *B1* (vgl. Abbildung 6.22).

Die Details und der Telegrammaufbau sind in Abschnitt 6.9 ausgeführt.

6.9 Telegrammtypen und Aufbau

6.9.1 Telegrammtypen und Auswahl

Die Anforderungen an die Funkverbindung und damit auch an das Protokoll beinhaltet die Einhaltung der Norm [EN50159-2 2002] bezüglich der Bedrohungs-Schutzmaßnahmenmatrix (vgl. Abbildung 6.21).

Aufgrund der äußeren Randbedingungen des Projektablaufs war die Nutzung eines bereits existierenden und erprobten Telegramms auf durch den Auftraggeber geschütz-

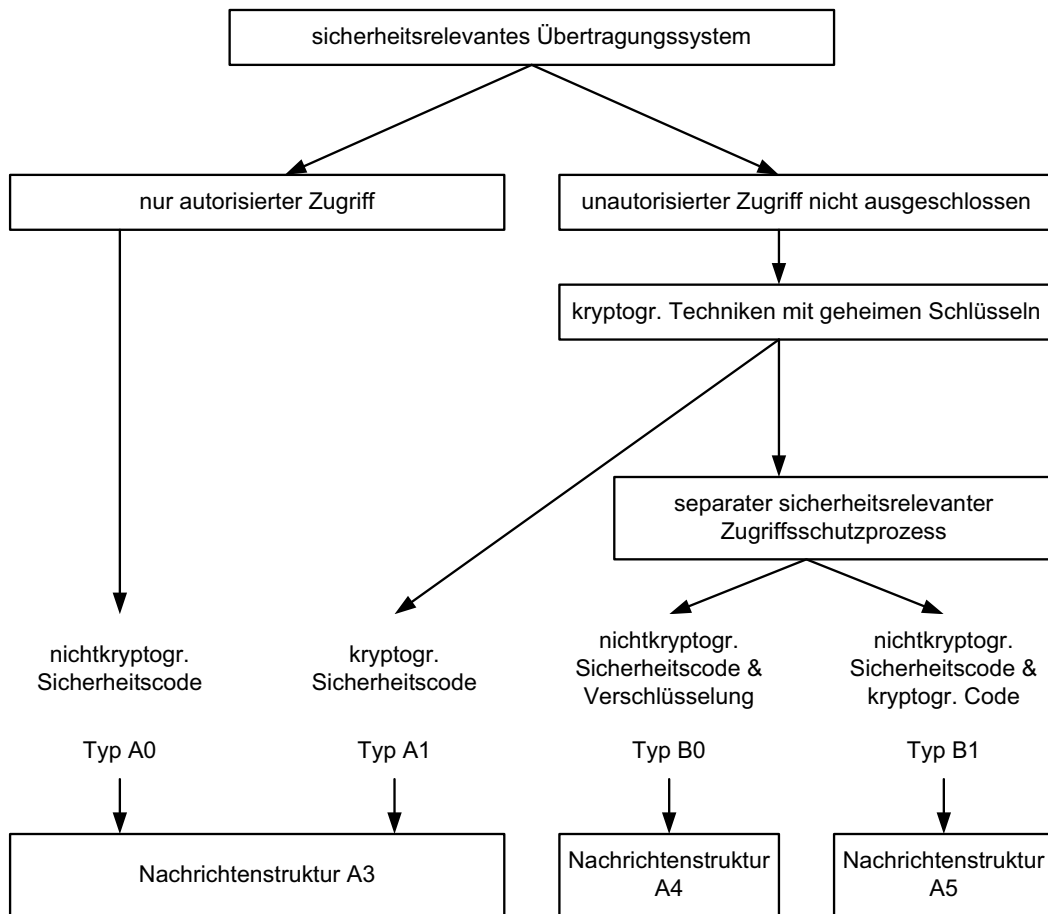


Abbildung 6.22: Auswahl einer Nachrichtenstruktur nach [EN50159-2 2002] entsprechend der Randbedingungen

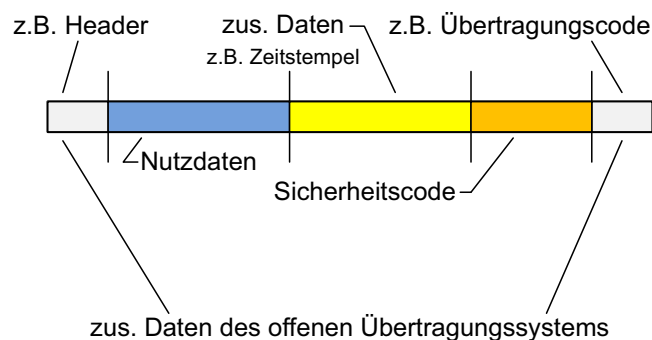


Abbildung 6.23: Modell der Nachrichtendarstellung innerhalb des Übertragungssystems (Typ A0 & A1) nach [EN50159-2 2002]

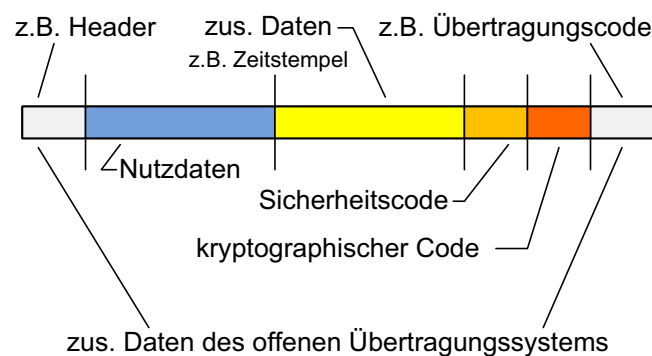


Abbildung 6.24: Modell der Nachrichtendarstellung innerhalb des Übertragungssystems (Typ B1) nach [EN50159-2 2002]

te Telegramme eingeschränkt worden.

Die normgerechten Schutzmaßnahmen sind in einem ähnlichen Protokoll für die sicherheitsrelevante Kommunikation, dem SAHARA-Protokoll, bereits erprobt. Die Lizenz an diesem Telegrammaufbau besitzt ein Konsortium, dem *Alcatel* und die *Siemens AG* angehören. Auf Basis dieses Protokolls wird aus spezifischen Änderungen ein möglicher Telegrammaufbau für das zu entwickelnde Kommunikationssystem erarbeitet.

Tabelle 6.5 zeigt den Aufbau des SAHARA-Protokolls.

Feld	Länge	Bedeutung
Nachrichtenlänge	2 Bytes	Anzahl der Oktette
Nachrichtentyp	2 Bytes	Dezimalwert des Nachrichtentyps
Empfängererkennung	4 Bytes	eindeutige Kennung zur sicheren Verbindung
Absendererkennung	4 Bytes	eindeutige Kennung zur sicheren Verbindung
Sequenznummer	4 Bytes	fortlaufende Telegrammnummer
bestätigte Sequenznummer	4 Bytes	unveränderte Sequenznummer des zuletzt empfangenen gültigen Telegramms
Zeitstempel	4 Bytes	Zeitstempel des Sendungszeitpunkts
bestätigter Zeitstempel	4 Bytes	unveränderter Zeitstempel des zuletzt empfangenen gültigen Telegramms
Nutzdaten	n Bytes	GPS-Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Fahrt- / Standrichtung, Anfahrtzeitpunkt, evtl. EOT-Kennung & ggf. Befehl
Sicherheitscode	8 Bytes	z.B. MD4 oder CRC64

Tabelle 6.5: Aufbau des SAHARA-Protokolls

6.9.2 Telegrammaufbau

Für die Kommunikation innerhalb des Übertragungssystems sollen Bestätigungstelegramme nach der Senden-und-Warten-Technik eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 6.8.2). Es sind somit mindestens zwei Telegrammtypen erforderlich, deren Rahmen jedoch identisch sein kann, d.h. die beiden Telegrammtypen Standard- und Bestätigungstelegramm unterscheiden sich lediglich durch den Inhalt des Nutzdatenfeldes. Der Rahmen der Übertragungstelegramme wird im Folgenden beschrieben und dimensioniert.

Telegrammversionskennung

Die Telegrammversion ist in dem SAHARA-Protokoll nicht vorgesehen, ist aber für das zu entwickelnde Kommunikationssystem aus den zu Beginn des Abschnitts 6.9 genannten Gründen zu berücksichtigen. Für die Dauer der Erprobungsphase sollen demnach keine kryptographischen Techniken implementiert werden. Für den späteren Einsatz und der Übertragung vertraulicher Daten wird eine Verschlüsselung der Daten gefordert. Zur Unterscheidung dieser beiden Telegrammtypen wird eine Telegrammversionskennung eingeführt, welche binär codiert in einem Datenfeld der Länge 1 Byte hinterlegt wird. Die erste Telegrammversion ohne Verschlüsselung trägt dabei die Versionskennung 1, die mit Verschlüsselung die Version 2 (vgl. Abbildung 6.25).

Die vollständige Erfüllung der normativen Vorgaben bezüglich des Einsatzes kryptographischer Techniken wird deswegen hier nicht verfolgt.

Nachrichtentyp

Die zu sendenden Nachrichten werden nach unterschiedlichen Typen entsprechend Abbildung 6.25 unterschieden. Das Datenfeld „Nachrichtentyp“ besitzt eine fixe Länge von 1 Byte und ist binär codiert. Das im SAHARA-Protokoll vorhandene Feld „Nachrichtenlänge“ ist somit für das zu entwickelnde Kommunikationssystem obsolet und wird nicht verwendet. Die feste Nachrichtenlänge kommt einer besseren Fehlererkennung zu Gute.

Telegrammversion	Nachrichtentyp		Sender	Empfänger
1	1	Standardtelegramm	Kommunikationsgerät des Wagens	Kommunikationsgerät der Lokomotive
	2	Bestätigungstelegramm	Kommunikationsgerät der Lokomotive	Kommunikationsgerät des Wagens
2	1	Standardtelegramm mit Verschlüsselung	Kommunikationsgerät des Wagens	Kommunikationsgerät der Lokomotive
	2	Bestätigungstelegramm mit Verschlüsselung	Kommunikationsgerät der Lokomotive	Kommunikationsgerät des Wagens

Abbildung 6.25: Mögliche Versionen des Übertragungsprotokolls und zugehörige Nachrichtentypen

Empfänger- und Absenderkennung

Die Fahrzeugnummer eines Eisenbahnwagens ist innerhalb des Einzugsbereichs des Internationalen Eisenbahnverbands (*UIC*) eindeutig. So müssen auch die Teilnehmer-Identifikationen der Kommunikationsgeräte innerhalb des Einzugsbereichs der *UIC* eindeutig sein. Es wird für die Empfänger- und die Absender-Identifikatoren jeweils ein 4 Byte Datenfeld vorgesehen, so dass mehr als 4 Mrd. Fahrzeuggeräte unterschieden werden können.

Sequenznummer

Die Sequenznummer nimmt im SAHARA-Protokoll eine Länge von 4 Bytes ein. Aufgrund der relativ seltenen Sendungen innerhalb des zu entwickelnden Kommunikationssystems ist eine Datenfeldgröße von 2 Byte hinreichend. Weiterhin ist ein Zählerüberlauf während einer Zugfahrt auszuschließen. Bei einer Datenfeldgrößegröße von 2 Byte und unter Annahme einer Sendung nach jeweils 15 Minuten ist ein Überlauf alle ca. 682 Tage zu erwarten. Für die Implementierung ist vorgesehen, dass eine Rücksetzung dieses Sequenzzählers bei erfolgreicher Inauguration erfolgt. Ein Zählerüberlauf während einer Zugfahrt ist ausgeschlossen.

Zeitstempel

Die Bestimmung des Sendezeitpunktes aus dem Positionstelegramm stellt eine zeitliche Auflösung im Sekunden-Bereich zur Verfügung. In der Regel sind GPS-Zeit und UTC-Zeit unkorreliert, d.h. die GPS-Zeit weicht um einige Sekunden von der UTC-Zeit und damit von der lokalen Zeit ab. Dies ist durch eingeführte Schaltsekunden der gesetzlichen Zeit begründet. Am 6. Januar 1980 um 0:00 Uhr betrug die Zeitdifferenz 0 s, heute beträgt sie 14 s^{1 2}.

¹<http://www.leapsecond.com/java/gpsclock.htm>

²<http://www.endruntechnologies.com/leap.htm>

Der Zeitstempel wird aus dem Systemtakt des Mikrocontrollers abgeleitet. Der 5-Byte-Lebenszeit-Zähler setzt sich dabei aus einem 1-Byte-Zähler des Mikrocontrollers und einem 4-Byte-Zähler in Software zusammen. Das höchste Byte des Zählers läuft dabei nach ca. 8,5 Jahren über. Somit ist ein eindeutiger Zeitstempel während eines Wartungsintervalls von 6 Jahren gewährleistet.

Für den Zeitstempel der Nachrichten werden die untersten vier Byte des Lebenszeit-Zählers (lifetime-counter) genutzt.

Nutzdatenfeld

Innerhalb des Nutzdatenfeldes wird die Übertragung von GPS-Positionsinformationen (Größe 8 Bytes), Geschwindigkeitsinformationen in [km/h] (Größe 1 Byte), Fahrt- bzw. Standrichtung in 10°-Sektoren (Größe 1 Byte), den Anfartszeitpunkt (dieselbe Größe wie der Zeitstempel), die Beschleunigung (Größe 1 Byte), die End-Of-Train-Kennung (EOT) (Größe 1 Bit) sowie für Sensordaten (Größe je nach Bedarf) vorgesehen. Die Gesamtlänge soll bis maximal 40 Byte betragen.

Sicherungsanhang

Die Informationen innerhalb eines Telegramms sollen durch einen Sicherungsanhang vor Verfälschung und Übertragungsfehlern geschützt werden. Entsprechend der Anforderungen an das Kommunikationssystem soll die Restbitfehlerwahrscheinlichkeit P_e kleiner als 10^{-7} sein (vgl. Abschnitt 6.2).

Aus dem im SAHARA-Protokoll verwendeten CRC64-Code mit 64 Bit Länge resultiert mit (6.5) eine Restbitfehlerwahrscheinlichkeit von $P_e = 2^{-64} = 5,42 \cdot 10^{-20}$.

Es wird daher die Verwendung eines CRC64-Codes zur Fehlererkennung vorgeschlagen.

Kryptographischer Code

Entsprechend [EN50159-2 2002] ist der Einsatz eines kryptographischen Codeanhangs erforderlich. Dafür ist ein 6 Byte großes Datenfeld vorgesehen. Die Auswahl eines kryptographischen Codeanhangs wurde nicht realisiert, da nach aktueller Einschätzung für Telegrammversion 1 keine zu schützenden, d.h. vertrauenswürdigen Informationen für die Übertragung vorgesehen sind.

6.10 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen für die Kommunikation vorgestellt sowie die einzusetzende Funkhardware ausgewählt. Nach einer kurzen Einführung in das ISO-OSI-Referenzmodells wurden drei grundlegende Funktions-Topologien der Kommunikation (Schicht 3) sowie die physikalischen Einflüsse auf die Funkkommunikation (Schicht 1 des ISO-OSI-Modells) dargelegt (vgl. Abschnitt 6.1).

Anschließend wurde in Abschnitt 6.2 Anforderungen an die Funkkommunikation und in Abschnitt 6.3 eine Einführung in die Funktionsweise von Funkbussen gegeben. Es wurden Modulationsverfahren, Zugriffsstrategien und mögliche Funktechnologien vorgestellt. Die Eigenschaften möglicher Funktechnologien, welche jeweils durch ein konkretes Funkmodul repräsentiert sind, wurden gegenübergestellt und mit Hilfe der Methode des *Paarweisen Vergleichs* bewertet (vgl. Abschnitt 6.5). In der Vorauswahl gehen die 24XStream- und XBee-PRO-Module der Firma *MaxStream* als Favoriten hervor (vgl. Abschnitt 6.4). Diese beiden Favoriten wurden in einer Freifeldumgebung, einer Nicht-Freifeldumgebung und im Bahnumfeld validiert (vgl. Abschnitt 6.6).

Die Ergebnisse der Versuche im Freifeld ergaben einen Negativausschluss der XBee-PRO-Module. Die ermittelten Ergebnisse zeigen weiterhin, dass die 24XStream-Module den Anforderungen mit Einschränkungen genügen. Die Reichweite für bis ca. 900 m im Freifeld und ca. 500 m im Bahnumfeld wurde nachgewiesen.

Eine Topologie ergibt sich quasi unmittelbar aus der Forderung nach einem optimalen Kosten-Nutzen-Verhältnis, d.h. aus den Anforderungen nach einem minimalen Energiebedarf, nach einer instantanen Kommunikation, z.B. im Fehlerfall sowie nach überschaubaren Investitions- und Wartungskosten. Es wurde daher die Stern-Funktions-Topologie ausgewählt (vgl. Abschnitt 6.7).

Für die Realisierung einer sicheren Kommunikation ist die Erfüllung der Norm [EN50159-2 2002] unabdingbar. Durch Analyse der Bedrohungen auf die Funkkommunikation im Bahnumfeld werden Sicherheitsmaßnahmen von der [EN50159-2 2002] vorgegeben (vgl. Abschnitt 6.8). Diese müssen in dem zu entwickelnden Übertragungsprotokoll erfüllt werden. Dazu wurde unter Verwendung des Referenztelegramms SAHARA ein Telegrammaufbau für die Realisierung einer sicheren Kommunikation entwickelt (vgl. Abschnitt 6.9). Die Dimensionierung der einzelnen Datenfelder ist Tabelle 6.6 zu entnehmen. Die maximale Telegrammlänge wird mit 68 Byte angenommen.

Feld	Länge	Bedeutung
Telegrammversion	1 Byte	Version des übertragenen Telegramms
Nachrichtentyp	1 Byte	Dezimalwert des Nachrichtentyps
Empfängerkennung	4 Bytes	eindeutige Kennung zur sicheren Verbindung
Absenderkennung	4 Bytes	eindeutige Kennung zur sicheren Verbindung
Sequenznummer	2 Bytes	fortlaufende Telegrammnummer
Zeitstempel	3 Bytes	Zeitstempel des Sendungszeitpunkts
Nutzdaten	bis zu 40 Bytes	z.B. GPS-Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Fahrt- / Standrichtung, Anfahrtzeitpunkt, evtl. EOT-Kennung & ggf. Befehl
Sicherheitscode	8 Bytes	z.B. CRC64
Kryptogr. Code	6 Byte	nicht definiert

Tabelle 6.6: Telegrammaufbau einer Nachricht entsprechend Telegrammtyp B1 der [EN50159-2 2002]

Kapitel 7

Realisierung

Die Entwicklungsphase der Realisierung kann als ein Abschnitt der methodischen, netzbasierten Systementwicklung nach BASYSNET verstanden werden (vgl. Abschnitt 2.1.3). Nach Abschluss der Versuche und der Auswahl der benötigten Komponenten wird in diesem Kapitel die Realisierung der Komponenten in Hard- wie in Software und ihre Integration beschrieben (vgl. Abbildung 7.1).

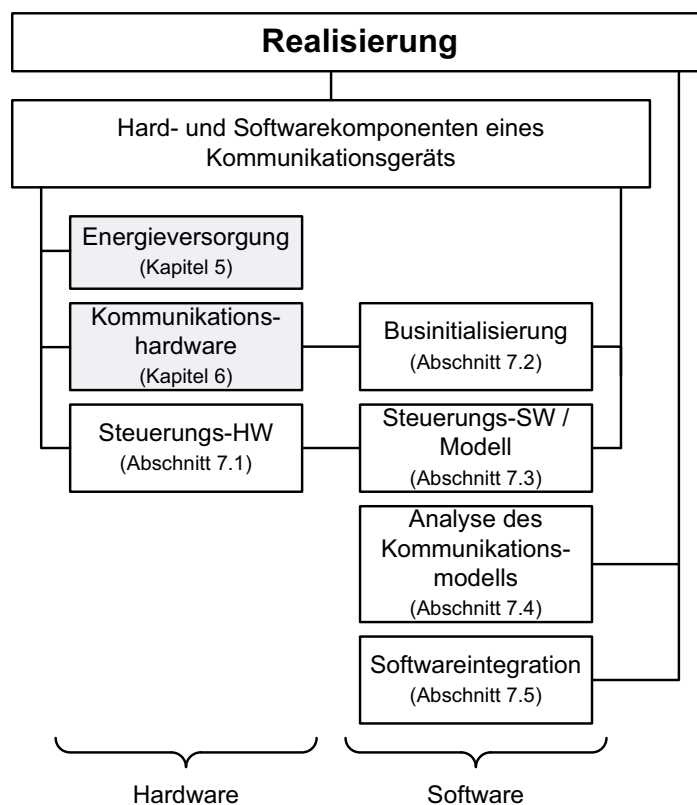


Abbildung 7.1: Hard- und Softwarekomponenten eines Kommunikationsgeräts und Gliederung des Kapitels Realisierung

7.1 Hardwarekonzept

Aus den funktionalen Anforderungen an das zu entwickelnde Kommunikationssystem (vgl. Abschnitt 3.4.3) ergibt sich die Verwendung der Komponenten Energieversorgung bzw. Energieerzeugung, Funkkommunikation, Positionsermittlung, Steuerung der Komponenten (vgl. Abschnitt 3.5 und Abbildung 7.2).

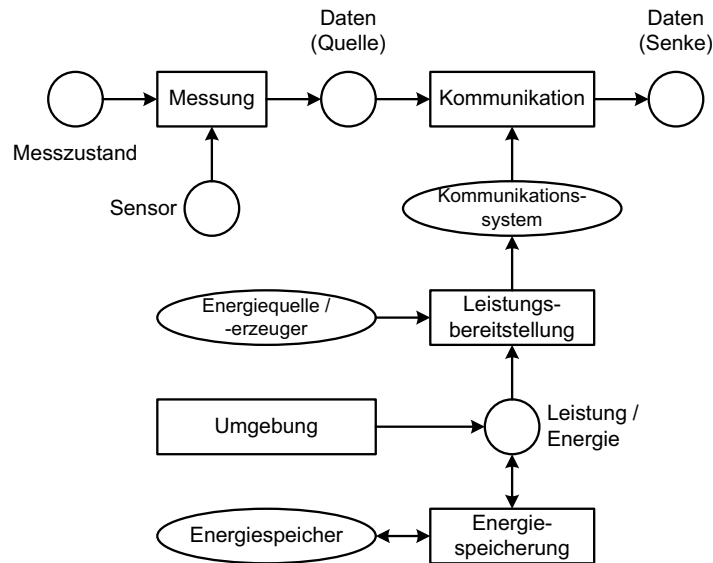


Abbildung 7.2: Kanal-Instanzen-Netz des Kommunikationsgeräts

7.1.1 Erweiterung der Anforderungen um Betriebsarten

Resultierend aus den äußeren Randbedingungen während der Projektbearbeitung ergeben sich erweiterte Anforderungen an das Kommunikationssystem.

- Es soll keine dezentrale Energiequelle oder Sensorik per Kabel an das Wagen-Kommunikationsgerät angebunden sein sowie keine Wartung des Gerätes innerhalb des Revisionszyklus von sechs Jahren erfolgen.
- Der jeweils letzte Wagen eines Fahrverbands soll zur Ermöglichung der Zugvollständigkeitsüberprüfung mit einem Kommunikationsgeräts ausgerüstet sein. Kann diese Anforderung nicht durch den betrieblichen Ablauf erreicht werden, ist ein Zugschluss-Kommunikationsgerät vorzusehen, welches z.B. mittels starker Magnete vor jeder Fahrt durch das Betriebspersonal im Rahmen der Bremsenprüfung angebracht werden müsste.
- Im Fehlerfall sollen Meldungen von den Wagen-Kommunikationsgeräten zu dem Lokomotiven-Kommunikationsgerät gesendet werden.

- Zur Sicherung der Kommunikation und Steuerung der Businitialisierung sollen gesendete Nachrichten der Wagen durch eine Bestätigungsnachricht mit Senden- und-Warten-Technik bestätigt werden können. Für das Zeitfenster werden die Werte $t_{wait,Standby} = t_{wait,Operation} = 3s$ bzw. $t_{wait,Inauguration} = 10s$ angenommen.
- Die Busauflösung soll durch manuellen Eingriff initiiert werden.

Die äußeren Randbedingungen des Projektablaufs wirken sich auf die Realisierung der Energieversorgung, auf die Auswahl der notwendigen Sensorik sowie auf das softwaregesteuerte Energiemanagement aus.

Die Energieversorgung soll so einfach wie möglich und vor allem wartungsfrei ausschließlich durch Verwendung von Primärbatterien realisiert werden. Achsgeneratoren und eine photovoltaische Energieerzeugung sind ausgeschlossen. Für die Energieversorgung eines Kommunikationsgeräts werden mit den erweiterten Anforderungen und entsprechend der Ergebnisse in Abschnitt 5.4.12 Lithium-Primärbatterien ausgewählt. Energiespeicher werden nicht benötigt. Dadurch müssen die Anforderungen bezüglich der Energieversorgung und des Energiebedarfs eines Kommunikationsgeräts erweitert werden (vgl. Abschnitt 7.1.6). Eine Spannungsüberwachung des Batteriezustands wird durch diese Anforderungen erforderlich.

Wie in Abschnitt 5.3 betrachtet, sind die Nutzungszeiten, d.h. die Fahrt- und die Standzeiten, abhängig vom jeweiligen Einsatzszenario. Zur Minimierung des benötigten Energiebedarfs ist die Realisierung eines Energiesparmodus notwendig. In diesem soll das Kommunikationsgerät so passiv wie möglich betrieben werden, d.h. nicht benötigte Komponenten des Kommunikationsgeräts werden, falls vorhanden, in einen Energiesparmodus versetzt oder die Energieversorgung z.B. durch Ansteuerung eines Transistors durch die Steuerungskomponente des Kommunikationsgeräts getrennt. Der Energiesparmodus soll immer dann aktiv sein, wenn sich ein Wagen nicht im betrieblichen Einsatz befindet, also während des Standes.

Während der Nutzungszeit soll das Kommunikationsgerät den in Abschnitt 3.4.3 definierten funktionalen Anforderungen genügen. Es muss folglich eine Unterscheidung zwischen den jeweiligen Betriebszuständen möglich sein. Es wird definiert, dass ein Gebrauch immer dann anzunehmen ist wenn sich der Wagen bewegt und ein Nichtgebrauch anzunehmen ist wenn der Wagen steht.

Da ein Wagen-Kommunikationsgerät keine externen Informationen über seinen Betriebszustand erhält, muss es diese Informationen eigenständig mit zusätzlicher Sensorik detektieren können. Die Detektion ist energiesparend durch Einsatz eines Neigungsschalters oder Mikrovibrationssensors möglich (vgl. Abschnitt 7.1.5).

Die Businitialisierung muss spätestens 30 Sekunden nach Anfahrt des Fahrverbands abgeschlossen sein (vgl. Abschnitt 6.2). Das bedeutet, dass Wagen-Kommunikationsgeräte

bis zum Abschluss der Businitialisierung mindestens alle 30 Sekunden einmal versuchen müssen, mit einem Lokomotiven-Kommunikationsgerät in Kontakt zu treten (vgl. Abschnitt 7.2). Während der Betriebsruhe, also des Stands eines Wagens, ist dies unnötig und steht im Widerspruch zu der Anforderung der Minimierung des Energiebedarfs.

Für die Realisierung eines effizienten Energiemanagements werden die folgenden drei Betriebsmodi eingeführt (vgl. Abbildung 7.11):

1. Energiesparmodus („standby“-Modus)
2. Betriebsmodus während der Businitialisierung („inauguration“-Modus)
3. Betriebsmodus während des betrieblichen Einsatzes („operation“-Modus)

Die Steuerung der Betriebsmodi von Wagen- und Lokomotiven-Kommunikationsgerät ist durch Implementierung in Software zu realisieren (vgl. Abschnitt 7.3).

Als Vorgriff auf die Beschreibung der Zustandsautomaten werden in den Abschnitten 7.1.2 und 7.1.3 die Funktionalitäten und die Betriebsmodi des Wagen-Kommunikationsgeräts und des Lokomotiven-Kommunikationsgeräts beschrieben.

7.1.2 Betriebsmodi eines Wagen-Kommunikationsgeräts

Energiesparmodus „Standby“

In dem Energiesparmodus wird die Funkkommunikationseinheit des Kommunikationsgeräts eines Wagens zyklisch alle 15 Minuten durch die Steuerungseinheit aktiviert. Die Steuerungseinheit überträgt das Standardtelegramm mit den aktuellen, betriebsbezogenen Nutzdaten (z.B. aktueller Position, aktueller Systemzeit) an die Funkkommunikationseinheit, welche das Standardtelegramm sendet. Für 3 Sekunden nach dem Senden wartet die Steuerungseinheit auf ein Bestätigungstelegramm. Bleibt dieses aus, so wird der Energiesparmodus des Funkkommunikationsmoduls aktiviert. Eine Positionsbestimmung ist nur dann erforderlich, wenn seit der letzten Positionsbestimmung eine Bewegung des Wagens erfolgt ist. Dies wird durch Auswertung eines Anfahrtssensors von der Steuerungseinheit überwacht. Zwischen den Sendungen befinden sich die Funkkommunikationseinheit sowie die Positionsermittlungskomponente in einem Energiesparmodus oder sie sind durch einen elektronisch von der Steuerungseinheit gesteuerten Schalter von der Energieversorgung getrennt.

Ein Wechsel von dem Energiesparmodus in den Modus der Businitialisierung („Inauguration“) erfolgt dann, wenn nach dem Senden des Standardtelegramms ein Bestätigungstelegramm empfangen wurde.

Modus der Businitialisierung „Inauguration“

Während der Businitialisierung wird die Funkkommunikationseinheit des Kommunikationsgeräts eines Wagens zyklisch alle 60 Sekunden durch die Steuerungseinheit aktiviert. Die Steuerungseinheit überträgt das Standardtelegramm mit den aktuellen, betriebsbezogenen Nutzdaten (z.B. aktueller Position, aktueller Systemzeit) an die Funkkommunikationseinheit, welche das Standardtelegramm sendet. Für 10 Sekunden nach dem Senden wartet die Steuerungseinheit auf ein Bestätigungstelegramm. Bleibt dieses aus, so wird für eine parametrisierte Zeit, z.B. 30 Minuten, weiterhin versucht, Bestätigungstelegramme auf gesendete Standardtelegramme zu empfangen. Ist diese parametrisierte Zeit verstrichen, so aktiviert die Steuerungseinheit des Kommunikationsgeräts dessen Energiesparmodus („Standby“). Eine Positionsbestimmung ist nur dann erforderlich, wenn seit der letzten Positionsbestimmung eine Bewegung des Wagens erfolgt ist. Dies wird durch Auswertung eines Anfahrtssensors von der Steuerungseinheit überwacht. Zwischen den Sendungen befinden sich die Funkkommunikationseinheit sowie die Positionsermittlungskomponente in einem Energiesparmodus.

Wird während der Businitialisierung („Inauguration“) ein Bestätigungstelegramm auf ein gesendetes Standardtelegramm empfangen, so wurde das Kommunikationsgerät des Wagens von dem Kommunikationsgerät einer Lokomotive diesem zugeordnet. Es erfolgt der Wechsel des Kommunikationsgeräts des Wagens von dem Modus der Businitialisierung in den Betriebsmodus („Operation“).

Erfolgt während Aktivierung des Modus der Businitialisierung eine Anfahrt, so aktiviert die Steuerungseinheit des Kommunikationsgeräts des Wagens das Positionsermittlungsmodul so lange, bis zwei aufeinanderfolgende Positionsdatensätze empfangen wurden. Danach wird das Positionsermittlungsmodul von dem Steuerungsmodul deaktiviert und die Funkkommunikationseinheit des Kommunikationsgeräts aktiviert. Die Steuerungseinheit überträgt zwei Standardtelegramme mit den zeitlich aufeinanderfolgenden, betriebsbezogenen Nutzdaten, vor allem der aktuellen Position und der aktuellen Systemzeit an die Funkkommunikationseinheit, welche das Standardtelegramm sendet. Wird daraufhin ein Bestätigungstelegramm empfangen, so wurde das Kommunikationsgerät des Wagens von dem Kommunikationsgerät einer Lokomotive diesem zugeordnet. Es erfolgt der Wechsel des Kommunikationsgeräts des Wagens von dem Modus der Businitialisierung in den Betriebsmodus („Operation“).

Betriebsmodus „Operation“

Innerhalb des Betriebsmodus („Operation“) wird die Funkkommunikationseinheit des Kommunikationsgeräts eines Wagens zyklisch nach einer parametrierbaren Zeit, z.B. alle 2 Minuten, durch die Steuerungseinheit aktiviert. Diese Zeit ist Bestandteil des Bestätigungstelegramms des Kommunikationsgeräts einer Lokomotive und wird von der Steuerungseinheit des Kommunikationsgeräts eines Wagens nur während des Be-

triebsmodus „Operation“ ausgewertet. Die Steuerungseinheit überträgt das Standardtelegramm mit den aktuellen, betriebsbezogenen Nutzdaten (z.B. aktueller Position, aktueller Systemzeit) an die Funkkommunikationseinheit, welche das Standardtelegramm sendet. Für 3 Sekunden nach dem Senden wartet die Steuerungseinheit auf ein Bestätigungstelegramm. Bleibt dieses aus, so wird für eine parametrisierte Zeit, z.B. 30 Minuten, weiterhin versucht, Bestätigungstelegramme auf gesendete Standardtelegramme zu empfangen. Ist diese parametrisierte Zeit verstrichen, so aktiviert die Steuerungseinheit des Kommunikationsgeräts dessen Energiesparmodus („Standby“). Eine Positionsbestimmung ist vor jedem Telegrammversand erforderlich. Zwischen den Sendungen befinden sich die Funkkommunikationseinheit sowie die Positionsermittlungskomponente in einem Energiesparmodus.

7.1.3 Betriebsmodi eines Lokomotiven-Kommunikationsgeräts

Energiesparmodus „Standby“

In dem Energiesparmodus des Kommunikationsgeräts einer Lokomotive werden die Funkkommunikationseinheit sowie die Positionsermittlungseinheit von der Steuerungseinheit permanent abgefragt. Empfängt die Funkkommunikationseinheit des Kommunikationsgeräts einer Lokomotive das Standardtelegramm eines Wagens, so wertet die Steuerungseinheit des Kommunikationsgeräts der Lokomotive die empfangenen Nutzdaten entsprechend der Plausibilitätsprüfung aus (vgl. Abschnitt 7.2.2). Ist diese Plausibilitätsüberprüfung der empfangenen Daten negativ verlaufen so werden die Daten des Wagen-Kommunikationsgeräts gespeichert, es erfolgt aber keine weitere Reaktion des Lokomotiven-Kommunikationsgeräts.

Ist diese Plausibilitätsüberprüfung der empfangenen Daten positiv verlaufen, so sendet die Steuerungseinheit ein Bestätigungstelegramm an das Kommunikationsgerät des entsprechenden Wagens. Es erfolgt ein Wechsel von dem Energiesparmodus in den Modus der Businitialisierung („Inauguration“).

Modus der Businitialisierung „Inauguration“

In dem Modus der Businitialisierung des Kommunikationsgeräts einer Lokomotive werden die Funkkommunikationseinheit sowie die Positionsermittlungseinheit von der Steuerungseinheit permanent abgefragt (vgl. Abschnitt 7.2). Empfängt die Funkkommunikationseinheit des Kommunikationsgeräts einer Lokomotive das Standardtelegramm eines Wagens, so wertet die Steuerungseinheit des Kommunikationsgeräts der Lokomotive die empfangenen Nutzdaten entsprechend der Plausibilitätsprüfung aus (vgl. Abschnitt 7.2.2). Ist diese Plausibilitätsüberprüfung der empfangenen Daten negativ verlaufen so werden die Daten des Wagen-Kommunikationsgeräts gespeichert, es erfolgt aber keine weitere Reaktion des Lokomotiven-Kommunikationsgeräts.

Ist diese Plausibilitätsüberprüfung der empfangenen Daten positiv verlaufen, so sendet die Steuerungseinheit ein Bestätigungstelegramm an das Kommunikationsgerät des entsprechenden Wagens.

Erfolgt während der Aktivierung des Modus der Businitialisierung die Anfahrsdetektion durch die Steuerungseinheit, so erfolgt ein Wechsel von der Businitialisierung in den Modus der Betriebsmodus („Operation“)

Betriebsmodus „Operation“

In dem Modus der Businitialisierung des Kommunikationsgeräts einer Lokomotive werden die Funkkommunikationseinheit sowie die Positionsermittlungseinheit von der Steuerungseinheit permanent abgefragt. Empfängt die Funkkommunikationseinheit des Lokomotiven-Kommunikationsgeräts das Standardtelegramm eines bereits während der „Inauguration“ als zum Fahrverband zugehörig bewerteten Wagens, so sendet die Steuerungseinheit ein Bestätigungstelegramm an das entsprechende Wagen-Kommunikationsgerät.

Eine Busauflösung und damit die Aktivierung des Energiesparmodus soll entsprechend der erweiterten Anforderungen in Abschnitt 7.1.1 durch Eingriff des Zugführers erfolgen. Empfängt die Funkkommunikationseinheit des Lokomotiven-Kommunikationsgeräts das Standardtelegramm eines bereits während der „Inauguration“ als zum Fahrverband zugehörig bewerteten Wagens in der Phase der Busauflösung, so sendet die Steuerungseinheit kein Bestätigungstelegramm an das entsprechende Wagen-Kommunikationsgerät.

7.1.4 Ressourcen eines Kommunikationsgeräts

Die funktionalen und technischen Anforderungen an die Energieversorgung, die Kommunikation, die Steuerung und den Aufbau (vgl. Abschnitte 3.4.2 und 3.4.3) sowie an die Sensorik (vgl. Abschnitt 7.1.1) können mit den Ressourcen in Abbildung 7.3 realisiert werden.

Funktionseinheit		Ressource (Gerätekomponente)	ausgewähltes Gerät
Kommunikation		Kommunikationsmodul	MaxStream 24XStream
Steuerung	der Betriebsmodi	Mikrocontrollereinheit	Chip45.com Crumb128-Modul mit Atmel ATmega128 µC
	der Kommunikation		
	des Energiemanagements		
Messung	Positionbestimmung	GPS-Empfänger	Holux GR-213
	Anfahrtsdetektor	Neigungsschalter	Bachem Neigungsschalter
			Sensolute Mikrovibrationssensor
Energie	Energieversorgung	Lithium-Primärbatterie	z.B. TekCell D01-1U
		Achsgenerator	keine Auswahl
		Photovoltaik	keine Auswahl
	Energiespeicherung	Nickel-Cadmium-Akkumulatoren	keine Auswahl
		SuperCap-Speicherkondensatoren	keine Auswahl
		Blei-Säure-Akkumulatoren	keine Auswahl
	Spannungsregulierung	Spannungsregelung & -überwachung	Zetex ZLDO330, ZLDO500
	Energiemanagement	realisiert durch Steuereinheit (Mikrocontroller)	
Aufbau	Verbindung	Platine in Eigenentwicklung	Siemens Prototyp
	Montage, Befestigung	Magnetbefestigung des Gehäuses am Wagen	
	Schutz	Gehäuse	z.B. FiBox MNX PCM 150 (IP67)

Abbildung 7.3: Ressourcenübersicht eines Kommunikationsgeräts

7.1.5 Komponenten

Bei der Komponentenauswahl wurde teilweise auf Erfahrungen und Geräte der *Siemens AG* zurück gegriffen, z.B. bei der Auswahl der GPS-Empfängermodule.

Kommunikation

Für die Funkkommunikation wurden, basierend auf den Ergebnissen der Validationsversuche, die 24XStream-Module der Firma *MaxStream* ausgewählt (vgl. Abschnitt 6.6.3) [MAXSTREAM 2005]. Abbildung 7.4 zeigt eine Produktabbildung des Herstellers *MaxStream*.



Abbildung 7.4: 24XStream Funktransceiver der Firma MaxStream

Steuerung der Komponenten

Zur Steuerung der Kommunikationsgeräte von Wagen- und Lokomotivgeräten muss, aufgrund der Anforderungen nach einer autarken Energieversorgung mittels Lithium-Primärbatterien (vgl. Abschnitt 7.1.1), eine energieeffiziente Mikrocontrollereinheit eingesetzt werden. Basierend auf persönlichen Erfahrungen wurde ein 8-Bit-RISC-Prozessor der Firma *ATMEL* vorgeschlagen und ausgewählt. Zur Ermöglichung des Anschlusses von Peripherie, z.B. Funkkommunikations- und Positionsermittlungsmodul, sowie für zukünftige Erweiterungsmöglichkeiten ist die maximal lieferbare Anzahl von zwei physikalischen seriellen Schnittstellen erforderlich. Dies ist z.B. bei dem ATmega128-RISC-Prozessor der Fall [ATMEL 2006].

Aufgrund des modularen Aufbaus wird dieser Mikrocontroller als Bestandteil einer Moduleinheit verwendet. Dabei handelt es sich um das Modul mit der Bezeichnung *Crumb128* der Firma *chip45.com*, welches die zwei seriellen Schnittstellen inkl. Pegelwandler (MAX232) bereitstellt [CHIP45.COM 2005]. Der Betriebstemperaturbereich des Mikrocontrollers liegt zwischen $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Es werden neben dem Betriebsmodus auch Energiesparmodi unterstützt. Unter Last, bei einer Taktfrequenz von 8 MHz und der Versorgungsspannung von 5 V, wird die maximale Energie von 95 mW, im Leerlauf-Zustand von 55 mW, benötigt. Im Energiesparmodus lässt sich der Energiebedarf auf wenige μW senken [ATMEL 2006]. Abbildung 7.5 zeigt eine Produktabbildung des Herstellers *chip45.com*.



Abbildung 7.5: Crumb128-Modul der Firma chip45.com

Sensor zur Positionsbestimmung

Der Positionsempfänger wurde auf Basis der Erfahrungen der *Siemens AG* ausgewählt. Eine Bewertung möglicher GPS-Empfänger ist damit nicht erforderlich. Es kommen Module vom Typ GR-213 der Firma *Holux* mit einem seriellen Anschluss zum Einsatz [HOLUX 2005]. Das Modul besitzt einen aktuellen SiRF III Chipsatz mit einem

20-Kanal-GPS-Empfänger sowie minimalen Startzeiten. Die Stromaufnahme liegt bei weniger als 80 mA bei einer Spannung von 5 V. Der Temperaturbereich von $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ entspricht den Anforderungen.

Die Positionsbestimmung nach einem Warmstart ist unwesentlich schneller als nach einem Kaltstart. Ein Heißstart ist dann möglich, wenn die letzte Positionsbestimmung maximal 2 Stunden zurück liegt. Ein Kaltstart dauert durchschnittlich 42 s, und ein Heißstart liefert eine gültige Positionsangabe nach wenigen Sekunden. Ist eine Positionsbestimmung erfolgt, so werden die Positionsdaten sekundlich ausgegeben.

Abbildung 7.6 zeigt eine Produktabbildung des Herstellers *Holux*.



Abbildung 7.6: GR-213 GPS-Empfänger der Firma Holux

Anfahrtssensor

Zur Detektion der Anfahrt im betrieblichen Einsatz entsprechend der erweiterten Anforderungen (vgl. Abschnitt 7.1.1) wird ein Neigungsschalter der Firma *Bachem* mit einem Schaltwinkel von 15° ausgewählt [BACHEM]. Dieser Sensor ist innerhalb des Temperaturbereichs zwischen $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ betriebsfähig und ist erhältlich z.B. bei *Conrad Electronic*. Erfahrungen bezüglich des Einsatzes im Bahnumfeld wurden bisher nicht ermittelt. Abbildung 7.7 zeigt diesen Sensor.

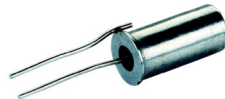


Abbildung 7.7: Bachem-Neigungsschalter mit einem Schaltwinkel von 15°

Energieversorgung

Entsprechend der erweiterten Anforderungen werden für die Energieversorgung der Kommunikationsgeräte an den Wagen Lithium-Primärbatterien des Typs D01-1U der

Firma *TekCell* ausgewählt (vgl. Abschnitt 7.1.1). Sie besitzen eine Spannung von typischen 3,6 V und eine Nennkapazität von 14 Ah pro Batterie. Der Temperaturbereich entspricht mit -55 °C bis +85 °C den in Abschnitt 3.3.3 definierten Anforderungen. Die Lebensdauer ist mit 10 Jahren angegeben [TEKCELL].

Eine Serienschaltung mehrerer Zellen sowie die Stabilisierung der Ausgangsspannung mittels eines Spannungsstabilisators dienen der vollständigen Nutzung der in der Zelle gespeicherten Energie. Die Energieversorgung ist z.B. durch eine Parallelschaltung mehrerer, jeweils in einer Reihenschaltung zweier Zellen verschalteter Batterien, realisierbar.

Vorteilhaft ist der Einsatz eines Spannungsreglers und -stabilisators mit einem hohen Wirkungsgrad und einer Spannungsüberwachung, welche speziell für batteriegespeiste Geräte vorgesehen sind und z.B. von der Firma *Zetex* angeboten werden. Abhängig von der benötigten Versorgungsspannung werden die Festspannungsregler ZLDO330 und ZLDO500 für Ausgangsspannungen von 3,3 V bzw. 5,0 V eingesetzt [ZETEX 1997a, ZETEX 1997b].

Aufbau

Die Komponenten für die Steuerung, für die Spannungsüberwachung sowie der Sensor zur Anfahrtsdetektion können, auf einer eigens entwickelten Platine montiert, in einem wetterfesten Kunststoffgehäuse nach dem Schutzstandard IP67 untergebracht werden. Für die prototypische Realisierung sind auf dieser Platine provisorische Steckplätze für das Funkkommunikationsmodul vorhanden. Eine provisorische Montage des Kunststoffgehäuses an einem Güterwagen ist mittels vier angeschraubter starker Magnete zu realisieren.

7.1.6 Energiebedarfsermittlung unter neuen Randbedingungen

Die überschlägige Berechnung des für den Betrieb eines Kommunikationsgeräts benötigten Energiebedarfs wurde in den Abschnitten 5.2 und 5.3 durchgeführt. Nach Auswahl der einzusetzenden Komponenten lässt sich aus den Nutzungsprofilen, unter Annahme von präziseren Randbedingungen entsprechend Abschnitt 7.1.1, überschlägig der benötigte Energiebedarf für den Betrieb eines Wagen-Kommunikationsgeräts berechnen.

Die Energie für die Speisung der Lokomotiven-Kommunikationsgeräte wird aus der Bordenergieversorgung entnommen, so dass eine Energiebedarfsermittlung nicht erforderlich ist. Es ist ein ununterbrochener Betrieb für den Zeitraum von sechs Jahren anzunehmen.

Für eine konservative Kalkulation werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Telegrammlänge des Standardtelegramms beträgt 68 Byte (vgl. Abschnitt 6.10), und die Übertragungsgeschwindigkeit der eingesetzten Funkmodule beträgt $9600 \frac{\text{Bit}}{\text{s}}$. Die Dauer für die Übertragung eines Telegramms ergibt sich somit zu $t_{TX, \text{Telegramm}} = 56 \text{ ms}$.
- Für die Positionsermittlung werden die Zeiten entsprechend der Angaben in Abschnitt 7.1.5 angenommen. Ein Kaltstart dauert durchschnittlich 42 Sekunden, ein Heißstart liefert einen Fix innerhalb weniger Sekunden und ein Warmstart ist nur unwesentlich schneller als ein Kaltstart.
- Für den Energiesparmodus „Standby“ des Wagen-Kommunikationsgeräts (vgl. Abschnitt 7.1.1) wird angenommen, dass alle 15 Minuten ein Telegramm gesendet wird. Nach dem Senden wird für 3 Sekunden auf ein Bestätigungstelegramm eines Lokomotiven-Kommunikationsgeräts gewartet. Für das Senden und Empfangen wird eine Operationszeit des Mikrocontrollers von 10 Sekunden angenommen. In der übrigen Zeit soll das Verhältnis von Energiespar- zu Tiefschlaf-Betrieb des Mikrocontrollers 1 zu 9 (Standby zu Sleep) betragen.
- Für die Businitialisierung „Inauguration“ wird für das Wagengerät eine durchschnittliche Dauer von 30 Minuten pro Fahrt angenommen. Zu Beginn der Inauguration sollen zweimalig die GPS-Daten ermittelt und ausgewertet werden. Nach dem minütlichen Senden des Telegramms wird für 10 Sekunden auf ein Bestätigungstelegramm gewartet. Für das Senden, Empfangen und Auswerten der Positionsdaten wird eine Operationszeit des Mikrocontrollers von 20 Sekunden pro Minute angenommen. Nach der Anfahrt werden erneut zweimalig die GPS-Daten ermittelt und ausgewertet. In der übrigen Zeit soll das Verhältnis von Energiespar- zu Tiefschlaf-Betrieb des Mikrocontrollers 1 zu 9 (Standby zu Sleep) betragen.
- Für den Betriebsmodus „Operation“ des Wagen-Kommunikationsgeräts wird ein Telegrammversand alle 2 Minuten angenommen. Nach dem Senden wird für 3 Sekunden auf ein Bestätigungstelegramm eines Lokomotiven-Kommunikationsgeräts gewartet. Alle zwei Stunden sollen GPS-Daten ermittelt werden. Für das Senden, Empfangen und Auswerten der GPS-Daten wird eine Operationszeit des Mikrocontrollers von 10 Sekunden pro 2 Minuten angenommen. In der übrigen Zeit soll das Verhältnis von Energiespar- zu Tiefschlaf-Betrieb des Mikrocontrollers 1 zu 9 (Standby zu Sleep) betragen.

Die für die Berechnung des Energiebedarfs des Wagengeräts relevanten Werte der Einsatzszenarien entsprechend Abschnitt 5.3 sind in Tabelle 7.1 zusammengefasst.

Unter diesen Randbedingungen wurden in einem ersten Schritt die durchschnittlichen Energiebedarfe in den einzelnen Betriebsmodi entsprechend Abbildung 7.8 berechnet. In einem zweiten Schritt wurde der erforderliche Energiebedarf pro Jahr und pro Revisionszyklus entsprechend Abbildung 7.9 berechnet.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Fahrzeit pro Jahr	780 h	207,96 h	3848 h
Standzeit pro Jahr	7980 h	8552,04 h	4912 h
Fahrten pro Jahr	261	12	261

Tabelle 7.1: Relevante Werte für die Berechnung des Energiebedarfs

Energiebedarf pro Stunde Standby		Wert	Leistung	Energie
TX-Rate	56,6 ms TX pro Minute	0,05667	0,78	0,04 Ws
RX-Rate	3 s RX pro Minute	3	0,43	1,29 Ws
Operation	10 s pro Minute	10	0,03	0,30 Ws
<i>Zwischensumme</i>				1,63 Ws p.min.
Cycle Rate (4x pro Stunde / alle 15 Min)		4		6,54 Ws p.h.
Standby	(3600 s - TX - RX - Operation)*10%	358,69	0,02	5,43 Ws p.h.
Sleep	(3600 s - TX - RX - Operation)*90%	3228,25	0,00	0,19 Ws p.h.
				12,16 Ws p.h.

Energiebedarf pro Inauguration		Wert	Leistung	Energie
TX-Rate	56,6 ms TX pro Minute	0,05667	0,78	0,04 Ws
RX-Rate	10 s RX pro Minute	10	0,43	4,30 Ws
Operation	20 s pro Minute	20	0,03	0,60 Ws
<i>Zwischensumme</i>				4,94 Ws p. min
Durschn. Dauer	30 Minuten pro Inauguration	30	4,94	148,33 Ws p. 1/2h
2x GPS zu Beginn		2	18,07	36,13 Ws p. 1/2h
Operation für 2malige GPS-Auswertung		43	0,03	1,29 Ws p. 1/2h
2x GPS nach Anfahrt		2	18,07	36,13 Ws p. 1/2h
Operation für 2malige GPS-Auswertung		43	0,03	1,29 Ws p. 1/2h
Standby	(1800 s - TX - RX - Operation)*10%	168,39	0,02	2,55 Ws p. 1/2h
Sleep	(1800 s - TX - RX - Operation)*90%	1515,55	0,00	0,09 Ws p. 1/2h
				Pro Inauguration: 225,81 Ws p. 1/2h
				Pro Inauguration: 0,06 Wh p. 1/2h

Energiebedarf pro Stunde Operation		Wert	Leistung	Energie
TX-Rate	1x 56,6 ms TX pro Minute	0,05667	0,78	0,04 Ws
RX-Rate	1x 3 s RX pro Minute	3	0,43	1,29 Ws
Operation	10 s pro Minute	10	0,03	0,30 Ws
<i>Zwischensumme</i>				1,63 Ws p. min
Cycle Rate 30 p.h. (alle 2 Min)		30	1,63	49,03 Ws p.h.
1x GPS alle 120 Minuten (0,5 p.h.)		0,5	18,07	9,03 Ws p.h.
Operation für GPS-Auswertung		42	0,03	1,26 Ws p.h.
Standby	(3600 s - TX - RX - Operation)*10%	354,49	0,02	5,36 Ws p.h.
Sleep	(3600 s - TX - RX - Operation)*90%	3190,45	0,00	0,19 Ws p.h.
				64,87 Ws p.h.

24XStream-Module	
Telegrammlänge	68 Bytes
Übertragungsrate	9600 Baud
Übertragungszeit pro Telegramm	56,67 ms

GPS-Module	
Kaltstart	42 s
Heißstart	1 s

Abbildung 7.8: Berechnung des Energiebedarfs pro Stunde unter den angenommenen Randbedingungen

	Zeit	Energie	Energie
Szenario 1			
Stdn Operation p.a.	780 h	* 64,87 Ws p.h. =	50602,17 Ws p.a.
Stdn Standby p.a.	7980 h	* 12,16 Ws p.h. =	97023,88 Ws p.a.
Inaugurationen p.a.	261 Stk	* 225,81 Ws =	58935,69 Ws p.a.
			206561,74 Ws p.a.
			57,38 Wh p.a.
			344,27 Wh pro 6 Jahre
Szenario 2			
Stdn Operation p.a.	207,96 h	* 64,87 Ws p.h. =	13491,32 Ws p.a.
Stdn Standby p.a.	8552,04 h	* 12,16 Ws p.h. =	103978,96 Ws p.a.
Inaugurationen p.a.	12 Stk	* 225,81 Ws =	2709,69 Ws p.a.
			120179,96 Ws p.a.
			33,38 Wh p.a.
			200,30 Wh pro 6 Jahre
Szenario 3			
Stdn Operation p.a.	3848 h	* 64,87 Ws p.h. =	249637,38 Ws p.a.
Stdn Standby p.a.	4912 h	* 12,16 Ws p.h. =	59721,97 Ws p.a.
Inaugurationen p.a.	261 Stk	* 225,81 Ws =	58935,69 Ws p.a.
			368295,04 Ws p.a.
			102,30 Wh p.a.
			613,83 Wh pro 6 Jahre

Abbildung 7.9: Berechnung des Energiebedarfs unter den angenommenen Randbedingungen bezogen auf ein Revisionsintervall

Unter der Annahme der Parallelschaltung zweier in Reihe geschalteter Lithium-Primärzellen ergeben sich eine Spannung von 7,2 V und damit aus den Energiebedarfen pro Revisionszyklus in Abbildung 7.9 die Anforderungen an die Mindestladung der Batterien von 47,82 Ah in Szenario 1, 27,82 Ah in Szenario 2 und 85,25 Ah in Szenario 3.

Für die Ermittlung der realen Kapazität sind Zuschläge aufgrund von Selbstentladung, Alterung und Temperatur sowie der Tatsache, dass Batterien nicht zu 100 % entladen werden sollten, zu berücksichtigen. Die entnehmbare Energie wird mit 80 % angenommen, so dass sich für die effektive erforderliche Mindestkapazität ein Aufschlag von 20%, d.h. 57,83 Ah in Szenario 1, 33,38 Ah in Szenario 2 und 102,31 Ah in Szenario 3 ergibt.

Über Spannungswandler werden aus der anliegenden Spannung die erforderlichen Versorgungsspannungen von 3,3 V und 5,0 V generiert.

7.2 Businitialisierung

Die Initialisierung des Funkbusses erfolgt während der Inauguration (vgl. Abschnitt 7.2.1), welche eine Plausibilitätsprüfung als einen Bestandteil enthält (vgl. Abschnitt 7.2.2). Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte, modellierte und validierte Verfahren wurde über die *Siemens AG* zum Patent angemeldet und ist im Folgenden beschrieben [KUPKE et al. 2007].

7.2.1 Inauguration der Kommunikation

Ausgangssituation

Für das Verfahren der Inauguration sind grundsätzlich zwei Vorgehensweisen denkbar.

1. Wagen-Kommunikationsgeräte könnten permanent empfangsbereit sein um so auf eine Verbindungsanforderung eines Lokomotiven-Kommunikationsgeräts reagieren zu können. Die Energiebilanz eines Wagen-Kommunikationsgeräts würde dadurch negativ beeinflusst.
2. Wagen-Kommunikationsgeräte könnten zyklisch Telegramme aussenden, auf die dann ein Lokomotiven-Kommunikationsgerät reagiert. Die Energieversorgung eines Lokomotivgeräts erfolgt dabei durch die lokale Energieversorgung der Lokomotive.

Die Anforderung nach einem möglichst minimalen Energiebedarf entsprechend Abschnitt 7.1.6 schließt die erste Möglichkeit aus, so dass folgend eine Businitialisierung nach dem zweiten Verfahren entwickelt wurde.

Angenommen wird, dass sich die zu einem Fahrverband gehörenden Teilnehmer vor Beginn der Inauguration und der Reihungsermittlung in Funkreichweite zueinander befinden. Die Kommunikationsgeräte aller ausgerüsteten Fahrzeuge senden in regelmäßigen Zeitabständen ein Standardtelegramm an alle erreichbaren Kommunikationsgeräte der möglichen Führungsfahrzeuge, z.B. der Lokomotiven, im Funkreichweitenbereich aus. Abbildung 7.10 zeigt eine Übersicht der Ausgangssituation in der Richtungsgruppe eines Bahnhofs. Die Lokomotive *L1* im Richtungsgleis 7 ist das einzige Führungsfahrzeug in der Richtungsgruppe.

Das von den Kommunikationsgeräten auf den Wagen gesendete Standardtelegramm beinhaltet als essentielle Nutzdaten die Wagen-Identifikation, den Zeitstempel der letzten gültigen Positionsdaten, die letzte gültige Position (GPS), die letzte gültige Geschwindigkeit sowie den ggf. vorhandenen Anfahrtszeitpunkt des Wagens (vgl. Abschnitt 6.9.2).

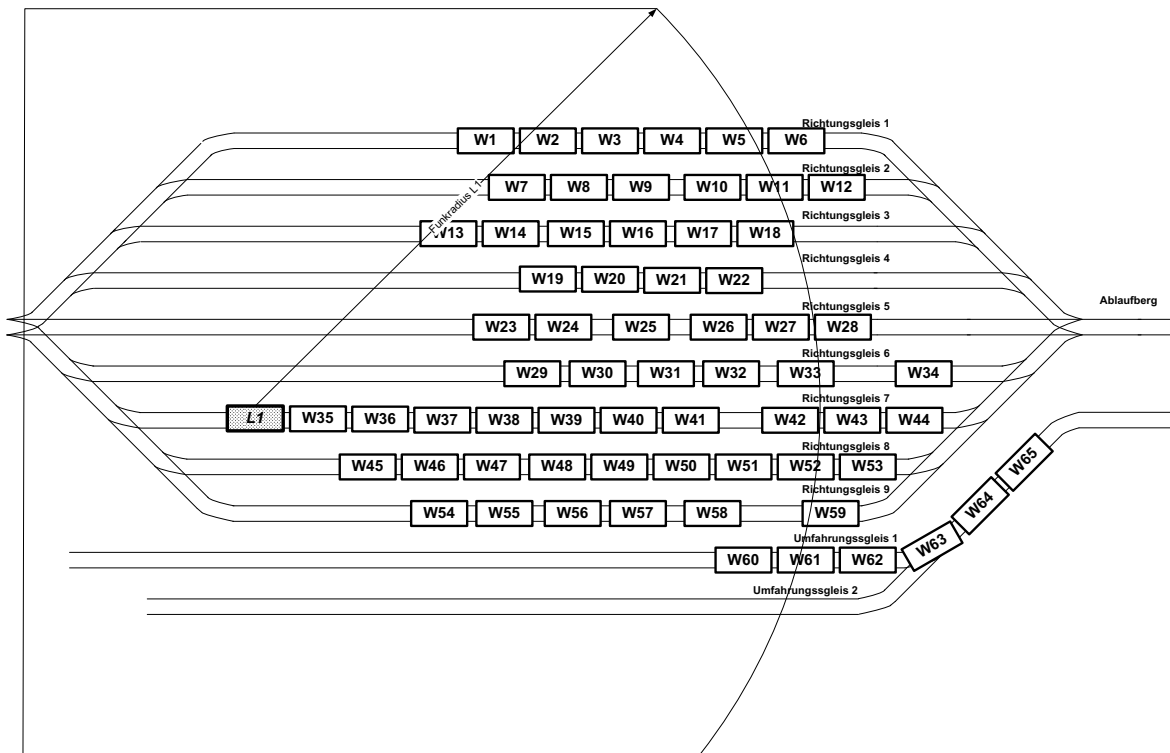


Abbildung 7.10: Ausgangssituation der Inauguration

Ablauf der Inauguration

Der Ablauf der Inauguration erfolgt entsprechend Abbildung 7.11 und ist folgend beschrieben.

1. Zu Beginn der Inauguration des Funkbusses und der Reihungsermittlung, in der die Fahrzeuge stehen, werden die Standardtelegramme von den Kommunikationsgeräten der Wagen W_i gesendet. Sie werden von den Kommunikationsgeräten jedes Führungsfahrzeugs L_j im Funkreichweitebereich, z.B. einer Lokomotive, empfangen und ausgewertet, indem die empfangenen Datensätze in einer „vorläufigen Fahrzeugliste“ registriert werden. Datensätze bisher noch nicht registrierter Wagen-Kommunikationsgeräte werden zu dieser „vorläufigen Fahrzeugliste“ hinzugefügt, Datensätze bereits registrierter Fahrzeuge werden ggf. aktualisiert.

Es ergibt sich somit eine „vorläufige Teilnehmerliste“ aller potenziellen Wagen-Kommunikationsgeräte in der Umgebung.

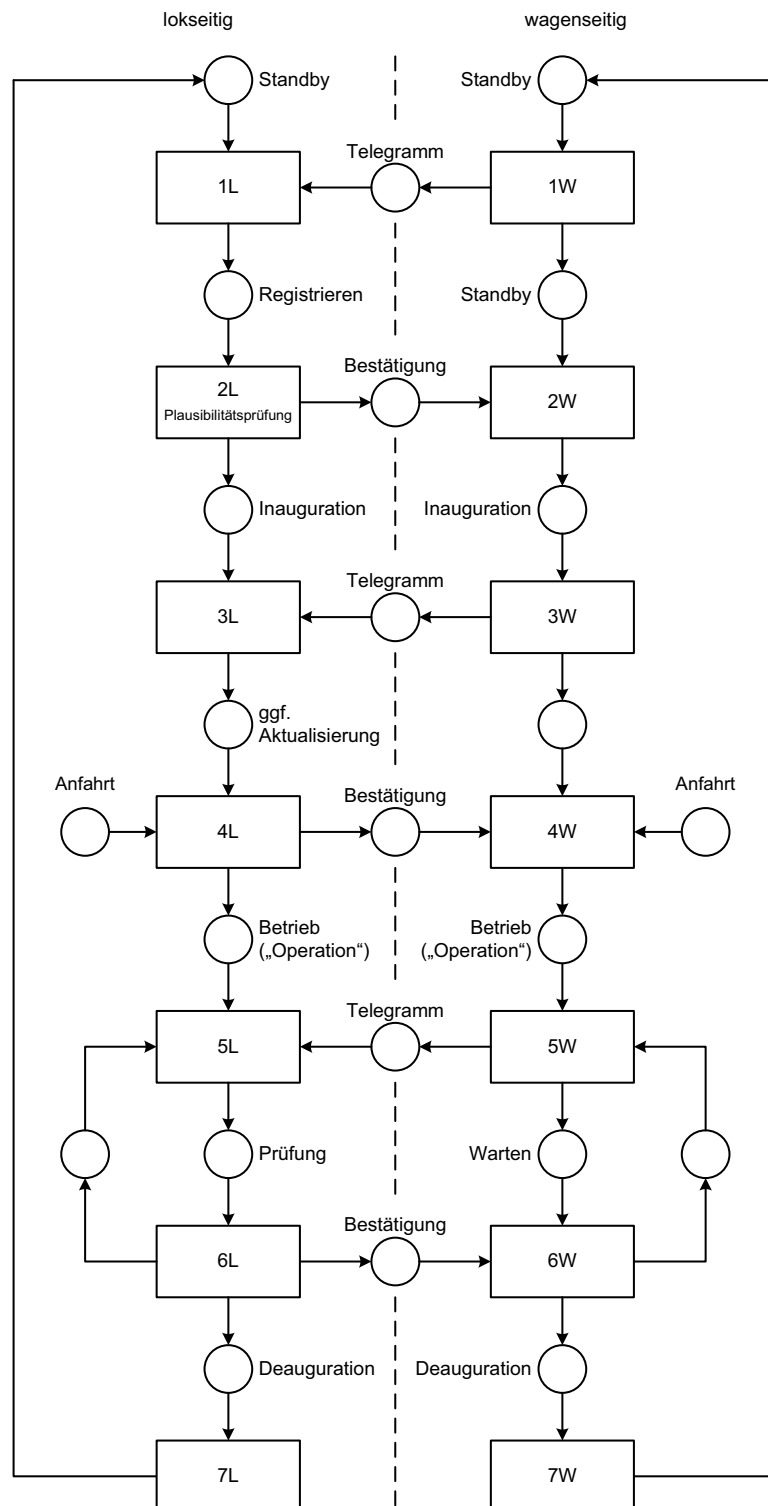


Abbildung 7.11: Kanal-Instanzen-Netz zum Ablauf der Kommunikation

2. Das von dem Kommunikationsgerät eines Führungsfahrzeugs empfangene Telegramm wird von der zugehörigen Steuerungseinheit (Mikrocontroller) in einer Plausibilitätsprüfung auf eine mögliche Fahrverbandszugehörigkeit überprüft (vgl. Abschnitt 7.2.2). Beurteilt werden dazu die Abstände zwischen den Fahrzeugen, die Fahrzustände und - falls vorhanden - die Anfahrtszeitpunkte der Fahrzeuge (vgl. Abschnitt 7.2.2).

Fällt das Ergebnis der Plausibilitätsprüfung positiv aus, so quittiert das Kommunikationsgerät des Führungsfahrzeugs den Empfang eines Standardtelegramms mit einem Bestätigungstelegramm (Acknowledge). Weiterhin wechselt das entsprechende Kommunikationsgerät des Führungsfahrzeugs von dem Energiesparmodus („Standby“) in den Modus der Businitialisierung („Inauguration“).

Grundsätzlich ist die Sendehäufigkeit der Wagen-Kommunikationsgeräte im Modus der Businitialisierung („Inauguration“) am größten. Das Kommunikationsgerät des Führungsfahrzeugs kann die Häufigkeit der gesendeten Telegramme im Betriebsmodus („Operation“) individuell für jedes Kommunikationsgerät eines Wagens parametrieren. Dazu wird innerhalb des Nutzdatenfelds des Bestätigungstelegramms die entsprechende Wartezeit für den zeitlichen Abstand zwischen zwei Standardtelegrammen an das Wagen-Kommunikationsgerät gesendet. So kann erreicht werden, dass z.B. die Sendehäufigkeit der Telegramme des Kommunikationsgeräts an dem potenziell letzten Wagen des Fahrverbands größer ist als die der Kommunikationsgeräte eines Wagens innerhalb des Fahrverbands. Dies ist z.B. für eine Zugvollständigkeitsüberwachung sinnvoll.

Empfängt ein Wagen-Kommunikationsgerät ein Bestätigungstelegramm zum ersten Mal, so wechselt dessen Modus vom Betriebsmodus „Standby“ in den Betriebsmodus „Inauguration“ (vgl. Übergang 2 zu 3 in Abbildung 7.11).

3. In dem Modus der Businitialisierung „Inauguration“ senden die Wagen-Kommunikationsgeräte in einem, in dem Bestätigungstelegramm des Lokomotiven-Kommunikationsgeräts an das Wagen-Kommunikationsgeräts festgelegtem zeitlichen Abstand von standardmäßig 2 Minuten weitere Standardtelegramme. Das Lokomotiven-Kommunikationsgerät empfängt diese und wertet sie aus. Falls das Wagen-Kommunikationsgerät dem Lokomotiven-Kommunikationsgerät bereits bekannt ist werden die vorhandenen Daten ggf. aktualisiert.
4. Ist das Wagen-Kommunikationsgerät bereits als plausibel zu dem Fahrverband gehörig bewertet worden (vgl. Abschnitt 7.2.2), so sendet das Lokomotiven-Kommunikationsgerät ein Bestätigungstelegramm an das Wagen-Kommunikationsgerät zurück. Ist es noch nicht plausibel dem Fahrverband zugehörig bewertet worden und fällt die Plausibilitätsprüfung negativ aus, sendet das Lokomotiven-Kommunikationsgerät kein Bestätigungstelegramm an das Wagen-Kommunikationsgerät.

Hat das Wagen-Kommunikationsgerät bereits einmal ein Bestätigungstelegramm erhalten und bleiben weitere Bestätigungstelegramme aus, so wechselt es nach einer parametrierbaren Zeit automatisch aus dem Betriebsmodus „Inauguration“ zurück in den Betriebsmodus „Standby“.

Empfängt ein Wagen-Kommunikationsgerät zum wiederholten Mal ein Bestätigungstelegramm vom selben potenziellen Führungsfahrzeug, so wird das Wagen-Kommunikationsgerät vom Betriebsmodus „Inauguration“ in den Betriebsmodus „Operation“ versetzt. In dem Betriebsmodus „Operation“ ist die Sendehäufigkeit der Standardtelegramme geringer als im Betriebsmodus „Inauguration“.

Der Funkbus zwischen den beiden Teilnehmern ist inauguriert, d.h. der Kommunikationseinrichtung des Führungsfahrzeugs ist damit sein zugehöriger Kommunikationspartner bekannt.

Die Inauguration ist mit dem Anfahren des Fahrverbands und einer damit verbundenen abschließenden Plausibilitätsprüfung unter Verwendung dynamischer Größen (z.B. Anfahrtszeitpunkt, Abstandsänderung zwischen Lokomotive und Wagen, Geschwindigkeit, Beschleunigung o.ä.) abgeschlossen. Der Plausibilitätsprüfung werden die Daten der bisher bekannten, d.h. in der „vorläufigen Reihungsliste“ befindlichen und der bisher plausibel bewerteten Wagen unterzogen.

5. Im Modus Betrieb oder „Operation“ sendet jedes Wagen-Kommunikationsgerät zyklisch ein Standardtelegramm an das Lokomotiven-Kommunikationsgerät.
6. Sofern Wagen-Kommunikationsgerät im Lokomotiven-Kommunikationsgerät registriert ist und plausibel bewertet wurde, sendet das Lokomotiven-Kommunikationsgerät ein Bestätigungstelegramm zurück an das Wagen-Kommunikationsgerät. Anderenfalls wird kein Bestätigungstelegramm zurückgesendet.
7. Durch manuellen Eingriff wird das Lokomotiven-Kommunikationsgerät so parametriert, dass es auf Standardtelegramme der Wagen-Kommunikationsgeräte keine Bestätigungstelegramme mehr sendet und nach einer Schutzzeit von z.B. 15 Minuten in den Energiesparmodus „Standby“ wechsel.

Bleiben weitere Bestätigungstelegramme des Lokomotiven-Kommunikationsgeräts an einen zum Fahrverband gehörenden Wagen für eine Zeit von z.B. 15 Minuten aus, so wechselt das Wagen-Kommunikationsgerät in den Energiesparmodus „Standby“.

7.2.2 Plausibilitätsprüfung als Bestandteil der Inauguration

Die Plausibilitätsprüfung besteht aus der Untersuchung der im folgenden genannten Parameter.

- **Abstand der Fahrzeuge zum Führungsfahrzeug**

Überschreitet der Abstand zwischen den Kommunikationseinrichtungen von Fahrzeugen des Fahrverbands und dem zugehörigen Führungsfahrzeug den den Anforderungen entsprechenden, maximal zugelassenen Abstand von 750 m für Güterzügen in Deutschland, Österreich und der Schweiz, also den sog. DACH-Ländern, so wird das Lokomotivengerät kein Bestätigungstelegramm generieren und senden.

Befinden sich Wagen und die Lokomotive innerhalb des zulässigen Entfernungsbereichs, so wird die „vorläufige Teilnehmerliste“ anhand des Abstandes zwischen den Wagen und der Lokomotive sortiert sowie der nächste Schritt der Plausibilitätsprüfung ausgewertet. Aus der „vorläufigen Teilnehmerliste“ wird so eine „vorläufige Reihungsliste“ generiert, die für die mögliche Parametrierung der Sendehäufigkeit, z.B. des Kommunikationsgeräts des letzten Wagens im Fahrverbands, erforderlich ist.

- **Fahrzustand der Fahrzeuge und des Führungsfahrzeugs**

Die Kommunikationsgeräte der zum Fahrverband gehörenden Wagen und das Kommunikationsgerät der Lokomotive sind mit einem geeigneten Sensor zur Anfahrsdetektion ausgestattet. Damit wird der Fahrzustand des Fahrzeugs ermittelt. Nach einer Anfahrt wird zweimal in Folge die GPS-Position ermittelt.

Die Geschwindigkeit zweier zeitlich nacheinander erfasster Positions-Datensätze muss bei einer Anfahrt größer als Null und zunehmend sein.

So kann die Fahrverbandszugehörigkeit zweifelsfrei festgestellt werden, auch wenn sich mehrere Fahrzeuge hintereinander in einem Gleis befinden, jedoch nicht alle zum selben Fahrverband gehören. D.h. wenn sich mehrere Zugteile hintereinander in einem Gleis befinden können nur die Wagen zu dem Fahrverband der Lokomotive gehören, deren Fahrzustand dem des Lokomotivengeräts entspricht.

- **Detektierte Anfahrtszeitpunkte der Wagengeräte und des Lokomotivengeräts**

Der Zeitpunkt der Anfahrt wird ebenfalls detektiert und als Zeitstempel gespeichert, welcher anhand des internen Systemzeitstempels des letzten gültigen Positionstelegramms und der bis zur Detektion der Anfahrt verstrichenen Zeit berechnet wird.

Die Anfahrtszeitpunkte der zu einem Fahrverband gehörenden Fahrzeuge müssen

bis auf eine maximale, endliche Zeitdifferenz für den Durchlauf des Impulses durch den Zug, d.h. ca. 3 Sekunden, mit dem Anfahrtszeitpunkt des Führungsfahrzeugs übereinstimmen. Ist dies der Fall, so ist die Plausibilitätsprüfung abgeschlossen.

Der letzte Wagen ist aufgrund der erweiterten Anforderungen aus Abschnitt 7.1.1 mit einem Kommunikationsgerät ausgerüstet und besitzt entsprechend der Reihungsliste den größten Abstand von der Lokomotive. Für das Lokomotiven-Kommunikationsgerät ist dieses Wagen-Kommunikationsgerät somit das Zugschlussgerät (EOT-Device).

Dem Kommunikationsgerät des Führungsfahrzeugs, z.B. der Lokomotive, steht nun eine „plausible Reihungsliste“ mit allen plausiblen Kommunikationsgeräten der zum Fahrverband gehörenden Fahrzeuge zur Verfügung. Wird künftig von dem Lokomotiven-Kommunikationsgerät ein Telegramm eines plausiblen Wagen-Kommunikationsgeräts empfangen, so wird das Lokomotiven-Kommunikationsgerät ein Antworttelegramm zurück senden und damit das plausible Wagen-Kommunikationsgerät im Betriebsmodus „Operation“ halten.

7.3 Modellierung, Softwarekonzept und Implementierung

Entsprechend der Anforderungen an die Energieversorgung (vgl. Abschnitt 7.1.6) und des Kanal-Instanzen-Netzes der Kommunikation in Abbildung 7.11 wurden drei Betriebsmodi vorgesehen.

Ziel der Modellbildung ist die Abbildung der Funktion und der funktionalen Abhängigkeiten von Lokomotiven-Kommunikationsgerät(en) und Wagen-Kommunikationsgerät(en) sowie letztlich die Validation des Modells und die Codegenerierung.

Die Basis des Modells bilden die zwei Teilmodelle „Lokomotivengerät“ für das Lokomotiven-Kommunikationsgerät und „Wagengerät“ für das Wagen-Kommunikationsgerät. Die beiden Teilmodelle bilden die Zustandsautomaten von Lokomotiven- und Wagengerät ab. Sie sind zueinander asynchron, interagieren über einen Übertragungskanal und werden durch die in den Abschnitten 7.1.2, 7.1.3 und 7.2 eingeführten Telegramme synchronisiert (vgl. Abbildungen 7.11 und 7.12). Der Übertragungskanal besteht physikalisch aus der Luftschnittstelle zwischen den Kommunikationsgeräten.

Mittels des Werkzeugs *TimeNET 3.0* wurden das Systemverhalten und das Kommunikationskonzept inkl. der Businitialisierung modelliert. Genutzt wurde dazu das Beschreibungsmittel der erweiterten generalisierten Stochastischen Petrinetze (EGSPN).

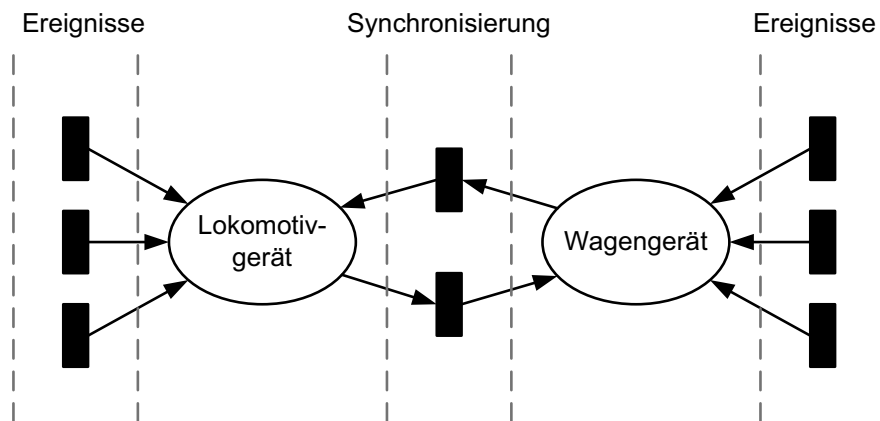


Abbildung 7.12: Transitions-gesteuerte Synchronisierung der Teilmodelle

Die Modellentwicklung erfolgt durch eine hierarchische Darstellung für das Teilmodell des Lokomotivengeräts in Abbildung 7.13 und für das Teilmodell des Wagengeräts in Abbildung 7.15. Diese entsprechen dem Kanal-Instanzen-Modell in Abbildung 7.11.

Die komplexen Modelle der unteren Hierarchieebene sind in den Abbildungen 7.14 für das Lokomotivengerät und 7.16 für das Wagengerät dargestellt.

7.3.1 Modell des Lokomotivengeräts

Das Modell des Lokomotivengeräts lässt sich in drei, in Abschnitt 7.1.1 eingeführte Betriebsmodi untergliedern und wird anhand des abstrahierten Modells in Abbildung 7.13 erläutert.

In dem Energiesparmodus (`P_standby_mode`) befindet sich der Zustandsautomat so lange, bis der empfangene Datensatz eines Wagengeräts die Plausibilitätsprüfung erstmals positiv bestanden hat (`T1`). Danach erfolgt der Moduswechsel in den „Inauguration“-Modus (`P_inauguration_mode`) (vgl. Abschnitt 7.2).

Abhängig davon, ob die Identität eines Wagengeräts bereits bekannt oder unbekannt ist, d.h. ob bereits ein Standardtelegramm dieses Wagen-Kommunikationsgeräts empfangen wurde, oder plausibel bewertet wurde, erfolgt bei dem Telegrammempfang in dem „Inaugurations“-Modus eine Fallunterscheidung entsprechend des folgenden Vorgehens:

1. Ist die Identität des Wagengeräts unbekannt, so wird diese von dem Lokomotivengerät erfasst (`waggon_is_known`) und eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt (`check_for_plausibility`) (vgl. Abschnitt 7.2.2). Diese Prüfung kann positiv oder negativ ausfallen. Im positiven Fall sendet das Lokomotivengerät ein Bestätigungstelegramm („Acknowledge“- oder ACK-Telegramm) zurück an das Wagengerät. Im negativen Fall wird kein Bestätigungstelegramm an das Wagengerät gesendet.
2. Ist die Identität des Wagengeräts bereits bekannt, so wird unmittelbar eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt (`check_for_plausibility`). Diese Prüfung kann positiv oder negativ ausfallen. Im positiven Fall sendet das Lokomotivengerät ein Bestätigungstelegramm zurück an das Wagengerät (impliziert in `T_loop_i`). Im negativen Fall wird kein Bestätigungstelegramm an das Wagengerät gesendet.
3. Ist die in dem Telegramm enthaltene Identität des Wagengeräts bereits als plausibel bewertet und dem Lokomotivengerät zugeordnet worden, so entfällt eine erneute Plausibilitätsprüfung und das Lokomotivengerät sendet ein Bestätigungstelegramm zurück an das Wagengerät (impliziert in `T_loop_i`).

Ein Moduswechsel in den Betriebsmodus (`P_operation_mode`) erfolgt unmittelbar nach Detektion der Anfahrt der Lokomotive und damit des Fahrverbands (Schalten von `T2` in Abbildung 7.13 bzw. von `T10` in Abbildung 7.14). Die Kommunikationsgeräte der Wagen, die Bestandteil des selben Fahrverbands sind, aktualisieren ihre kinematischen Größen zeitgleich aus den GPS-Positionsinformationen und senden diese zusammen mit Ihrer Identität an das Lokomotivengerät. Das Lokomotivengerät führt für alle bis zum Zeitpunkt der Anfahrt registrierten und bereits plausibel bewerteten Wagengeräte abschließend eine neue Plausibilitätsprüfung durch. Wagengeräten, welche die Plausibilitätsprüfung positiv bestehen, sendet das Lokomotivengerät nach jedem Empfang

eines Standardtelegramms eines Wagengeräts ein Bestätigungstelegramm zurück (vgl. T_loop_o in Abbildung 7.13). Wagengeräte, die die Plausibilitätsprüfung nicht bestehen, werden ignoriert.

Die Deauguration, also das Auflösen des Kommunikationsbusses, erfolgt ausgehend von dem Lokomotivengerät des Fahrverbands und durch manuellen Eingriff. In diesem Fall wird das Funkmodul des Lokomotivengeräts deaktiviert. Bestätigungstelegramme werden nicht mehr gesendet. Nach Schalten der Transition T3 (vgl. Abbildung 7.13) werden plausibel bewertete und registrierte Wagengeräte gelöscht und der Energiesparmodus aktiviert.

Das abstrahierte Modell aus Abbildung 7.13 lässt sich im Detail entsprechend Abbildung 7.14 darstellen.

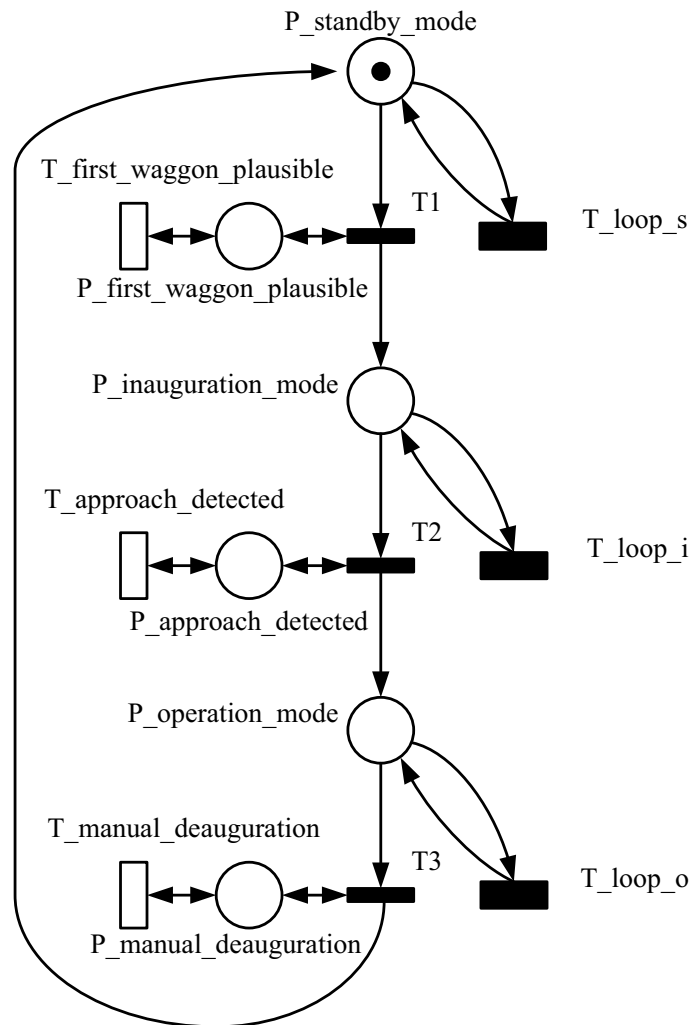


Abbildung 7.13: Abstrahiertes Modell des Lokomotivengeräts

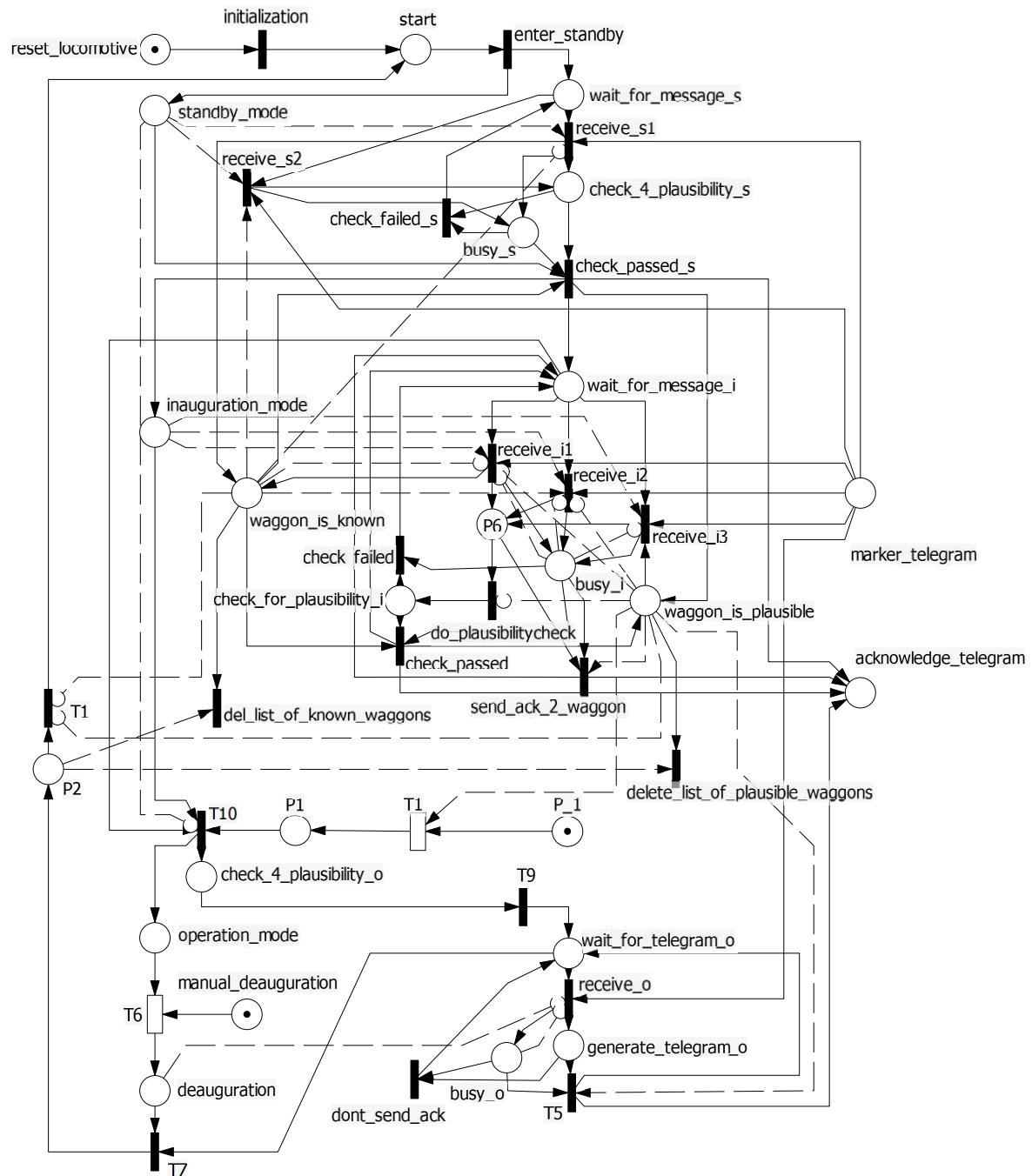


Abbildung 7.14: Modell des Lokomotivengeräts

7.3.2 Modell des Wagengeräts

Für das Modell des Wagengeräts sind, analog zu dem des Lokomotivengeräts, ebenfalls drei Betriebsmodi vorzusehen.

In dem Energiesparmodus (`P_standby_mode`) sendet das Wagen-Kommunikationsgerät zyklisch, alle 15 Minuten, ein Standardtelegramm („Marker“) per Broadcast aus. Dies ist in Abbildung 7.15 implizit durch die Transition `T_loop_s` modelliert. Dabei werden die aktuellen kinematischen Größen des Wagens, wie z.B. Position und Geschwindigkeit, aus den GPS-Positionstelegramm extrahiert und mitgesendet. Das beschriebene zyklische Senden ist aus Abbildung 7.16 durch die Transition (`wait_to_send_s`) modelliert.

Nach dem Senden des Standardtelegramms wird für eine feste Zeit der Empfang eines Bestätigungstelegramms eines Lokomotivengeräts abgewartet. Zu finden ist dies im Modell in Abbildung 7.16 in der Transition der zeitbehafteten Transition (`acknowledge_not_received_s`). Bleibt das Bestätigungstelegramm aus, so wird eine erneute Sendung nach Ablauf der parametrisierten Zeit der zeitbehafteten Transition (`T_loop_s` bzw. `wait_to_send_s`) durchgeführt.

Wird vor Ablauf der Wartezeit ein Bestätigungstelegramm eines Lokomotivengeräts empfangen, also vor dem Schalten der zeitbehafteten Transition (`acknowledge_not_received_s`) in Abbildung 7.16, so wechselt das Wagengerät den Betriebsmodus von „Standby“ in den Modus der Businitialisierung („Inauguration“). Der Platz (`P_inauguration_mode`) in Abbildung 7.15 bzw. (`inauguration_mode_w1`) in Abbildung 7.16 wird belegt. Der „Inauguration“-Modus unterscheidet sich von dem „Standby“-Modus durch häufigeres Senden des Standardtelegramms, z.B. alle (`build_and_send_telegram_i`) = 60 s. Der Modus der „Inauguration“ bleibt so lange aktiv bis eine der beiden folgenden Situationen eintritt:

1. Schalten der zeitbehafteten Transition (`note_mode_change_i`) (vgl. Abbildung 7.16). D.h. wenn für diese Zeit kein Bestätigungstelegramm empfangen wurde, dann wechselt der Betriebsmodus des Wagen-Kommunikationsgeräts in den Energiesparmodus („Standby“).
2. Empfang des Bestätigungstelegramms während der Betriebsmodus „Inauguration“ des Wagen-Kommunikationsgeräts aktiv ist, also Schalten der Transition (`acknowledge_received_i`) (vgl. Abbildung 7.16 und Abschnitt 7.2.1). Es erfolgt der Wechsel in den „Operation“-Modus (vgl. Abbildung 7.11).

In dem Betriebsmodus „Operation“ bestimmt ein Wagengerät entsprechend der parametrierbaren, zeitbehafteten Transition (`build_and_send_telegram_o`) zyklisch die kinematischen Größen des zugehörigen Wagens, generiert und sendet ein Standardtelegramm an das Kommunikationsgerät der Führungslokomotive (vgl. Abbildung 7.16).

Die Zeit der Transition (`build_and_send_telegram_o`) kann durch das Bestätigungstelegramm des Lokomotivengeräts geändert werden. Dies ist z.B. für die Realisierung einer Zugvollständigkeitsprüfung erforderlich, so dass das Lokomotivengerät häufiger Informationen des letzten ausgerüsteten Wagens erhält (z.B. (`build_and_send_telegram_o`) = 120 s).

Wird vor dem Schalten der zeitbehafteten Transition (`acknowledge_not_received_o`) ein Bestätigungstelegramm des Lokomotiven-Kommunikationsgeräts empfangen, so wird nach Schalten der Transition (`build_and_send_telegram_o`) erneut die Position bestimmt und an das Kommunikationsgerät der Führungslokomotive gesendet.

Der Betriebsmodus „Operation“ (`operation_mode_w1`) bleibt bis zum Schalten der zeitbehafteten Transition (`note_mode_change_o`) aktiv, d.h. wenn für diese Zeit kein Bestätigungstelegramm auf ein von dem Wagengerät gesendetes Standardtelegramm empfangen wurde. Es erfolgt der Wechsel in den Energiesparmodus (`standby_mode_w1`) (vgl. Abbildung 7.16).

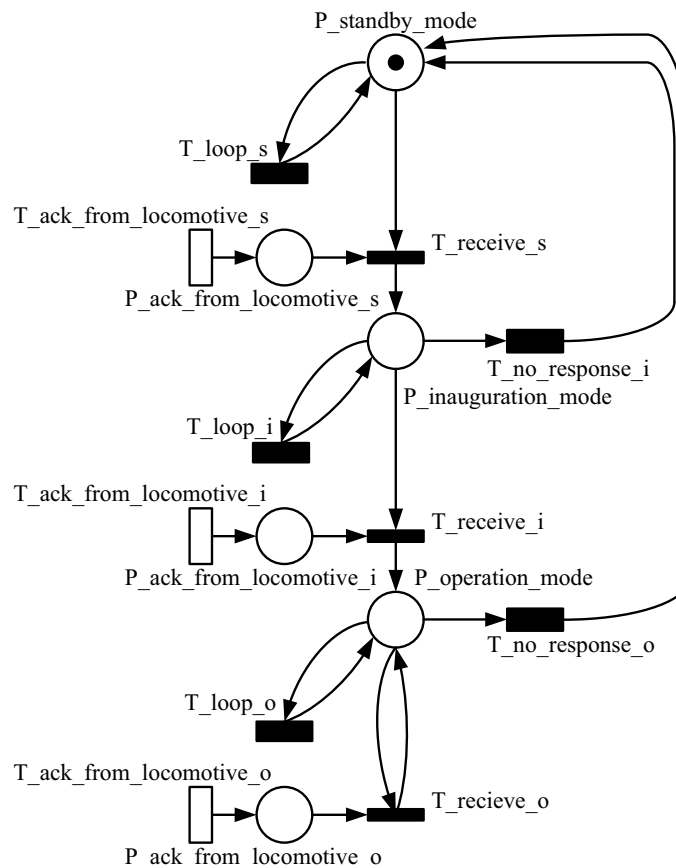


Abbildung 7.15: Abstrahiertes Modell des Wagengeräts



Abbildung 7.16: Modell des Wagengeräts

7.3.3 Kombination der Teilmodelle

Bisher wurden die Teilmodelle von Wagen- und Lokomotiven-Kommunikationsgerät einzeln betrachtet. Das zu entwickelnde Kommunikationssystem besteht jedoch aus mindestens zwei Kommunikationseinheiten, einem Lokomotivengerät und einem Wagengerät. Die Kombination dieser Kommunikationsgeräte ist durch entsprechende Kopp- lung der Teilmodelle von Lokomotiven- und Wagen-Kommunikationsgerät modellier- bar, wobei der Übertragungskanal die Schnittstelle zwischen den Teilmodellen darstellt. Unter Annahme eines idealen Übertragungskanals lassen sich die Teilmodelle über die Plätze „maker_telegram“ und „acknowledge_telegram“ koppeln (vgl. Abbildungen 7.14 und 7.16).

Gerade auf Funkstrecken ist kein idealer Übertragungskanal vorhanden (vgl. Abschnitt 6.1.3). Daher wird der reale Kommunikationskanal durch ein einfaches Kanalmodell entsprechend Abbildung 7.17 modelliert. Das Modell berücksichtigt durch den Platz (ChP3) eine Kanalbelegung für mehrere physikalische FHSS-Kanäle, auf denen paral- lele Übertragungen möglich sind.

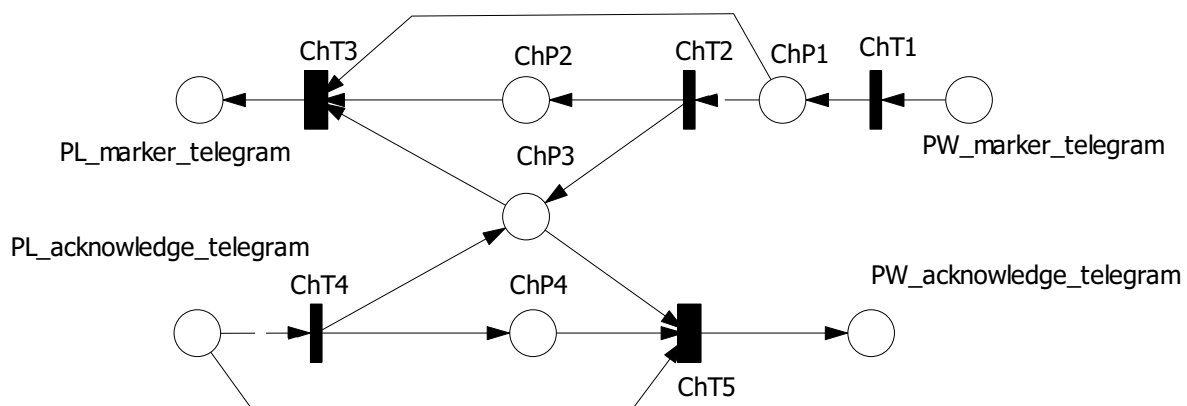


Abbildung 7.17: Modell des Übertragungskanals

Die Kopplung der Teilmodelle kann prinzipiell durch folgende Vorgehensweisen erfolgen:

- Vervielfältigung der Teilmodelle durch Kopieren (Copy&Paste)
- Verwendung farbiger Petrinetze (CPN)
- Analyse höherer Komplexitäten durch Monte-Carlo-Simulation am Petrinetzmodell
- Transformation des Petrinetzes in C-Quellcode, objektorientierte Implementierung der Randbedingungen sowie Monte-Carlo-Simulation mit dem C-Quellcode

Das für die Modellierung der Teilmodelle eingesetzte Werkzeug *TimeNET 3.0* unterstützt keine farbigen Petrinetze und ist daher für die Modellierung und Analyse beliebiger Kombinationen im höherdimensionalen Fall ungeeignet. Die höheren Dimensionen sind nur durch Vervielfachung der Teilmodelle im Gesamtmodell darstellbar. Dieses Vorgehen führt zur Unübersichtlichkeit des Gesamtmodells, ist aufwändig und sehr fehlerträchtig. Die Analysemöglichkeiten sind dadurch begrenzt. Als Vorgriff sei hier auf Tabelle 7.2 verwiesen.

Die Analyse und Diskussion der einzelnen Möglichkeiten der Vervielfältigung ist in Abschnitt 7.4 ausgeführt.

7.4 Analyse des Modells

Die Analyse der Teilmodelle Wagengerät und Lokomotivengerät, und wenn möglich einer beliebigen Kombination, dient der Qualitätssicherung des Systems. Jeder Fehler, der schon zu Beginn bzw. während der Implementierungsphase entdeckt wird, vermindert das Risiko von Nachbesserungen. Eine Behebung eines Fehlers in der Software eines Kommunikationsgeräts ist nur durch direktem Zugriff auf das Gerät und damit verbundenem logistischen Aufwand behebbar. Das grundlegende Konzept der Qualitätssicherung bei der Entwicklung von Automatisierungssystemen sind die Fehlererkennung und Fehlervermeidung. Dazu können die Methoden der Validation, der Verifikation sowie der Diagnose eingesetzt werden [SCHNIEDER 1999].

- In der Validation, dem Gültigkeitsnachweis, kann durch die Simulation oder den Test und dem anschließenden Vergleich von Ergebnissen und Eigenschaften von modellierten Entwicklungsobjekten mit vorher spezifizierten Eigenschaften die Gültigkeit und Plausibilität der Entwicklungsergebnisse belegt werden. Eine Vollständigkeit ist, gerade bei komplexen Systemen, kaum zu erreichen.
- In der Verifikation, dem Wahrheitsbeweis, wird durch analytische, mathematische Verfahren, z.B. durch ein Petrinetz, die Existenz bestimmter Eigenschaften bewiesen oder widerlegt.

- In der Diagnose werden Fehler durch den Vergleich von IST- und SOLL-Verhalten während des Betriebes entdeckt oder identifiziert. Dies ist, gerade bei sicherheitsrelevanten Anwendungen, nicht akzeptabel.

Die Möglichkeiten der Kombination und der Vervielfältigung der Teilmodelle wurden bereits in Abschnitt 7.3.3 diskutiert.

7.4.1 Analyse unter Verwendung erweiterter, generalisierter, stochastischer Petrinetze

Die einfache Kombination eines Lokomotiven- und eines Wagengeräteteilmodells sowie die Analyse erfolgte mittels des Werkzeugs *TimeNET 3.0*. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.2 zusammengefasst.

Für einen Funktionsnachweis des komplexen Verhaltens innerhalb eines Zugbildungsbahnhofs für beispielsweise 1000 Wagen und 40 Lokomotiven ist jedoch ein Modell des hochdimensionalen Falls mit entsprechend 1000 Wagengeräten und 40 Lokomotivengeräten erforderlich. Für diese Komplexität ist *TimeNET* ungeeignet (vgl. Abschnitt 7.3.3).

Mit Hilfe des am *Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Braunschweig* entwickelten Werkzeugs *II-Tool* wurden die Erreichbarkeitsgraphen der Teil- und Kombinationsmodelle für niedrige Dimensionen aus *TimeNET* importiert und berechnet. Diese Erreichbarkeitsanalyse liefert als Ergebnis die Anzahl der erreichbaren Zustände sowie die der „Deadlocks“ des entsprechenden Modells. Der Begriff Deadlock bezeichnet eine partielle Verklemmung, d.h. auf der Netzebene eine Stellenmenge, die nie wieder durch das Schalten einer Transition markiert werden kann.

Die Ergebnisse der Analysen sind in Tabelle 7.2 zusammengefasst. Schon die Verdopplung eines Wagengeräts liefert unter Annahme eines idealen Kommunikationskanals über 139354 Zustände, die Kombination aus einem Lokomotiven- und einem Wagengerät immerhin 878 mögliche Zustände in dem Erreichbarkeitsgraphen. Die Analyse schlägt schon bei der Kombination aus einem Lokomotivengerät und zwei Wagengeräten unter Verwendung eines realen Kommunikationskanals fehl.

7.4.2 Analyse unter Verwendung gefärbter Petrinetze

Für die Analyse der geforderten Komplexität sind andere Methoden, wie z.B. die Verwendung farbiger Petrinetze oder eine Monte-Carlo-Simulation, erforderlich. Für die Analyse mit Hilfe farbiger Petrinetze kam z.B. das Werkzeug *CPNTools* in Betracht, da weiterhin eine Möglichkeit der Codegenerierung aus diesem Werkzeug heraus möglich schien. Da *CPNTools* keine Schnittstelle für den Import von *TimeNET*-Modellen

TEILNEHMER	P	T	EG	DEADLOCKS
Modell d. realen Kanals	8	9	-	-
1 Lok, 0 Wagen, idealer Kanal	25	24	3	1
0 Loks, 1 Wagen, idealer Kanal	16	16	4	1
1 Lok, 1 Wagen, idealer Kanal	42	45	878	0
1 Lok, 1 Wagen, realer Kanal	46	51	2287	0
2 Loks, 0 Wagen	66	50	8	1
2 Loks, 1 Wagen, idealer Kanal	64	66	11498	4
2 Loks, 1 Wagen, realer Kanal	70	75	119494	0
1 Lok, 2 Wagen, idealer Kanal	61	72	139354	0
1 Lok, 2 Wagen, realer Kanal	73	90	nicht lösbar	nicht lösbar

Tabelle 7.2: Zustandsraumanalyse mit II-Tool

bietet, wurden die Teilmodelle händisch portiert.

Zur Verwendung in den bestehenden Teilmodellen sind Testkanten (Inhibitorkanten) erforderlich, welche von dem eingesetzten Werkzeug *CPNTools* in der Version 2.2.0 nicht nativ unterstützt werden. Es wurden zwei mögliche Umgehungsansätze (Workarounds) für dieses Problem untersucht¹, die jedoch für die Analyse nicht anwendbar waren. Die Begründung liegt in der Tatsache, dass aufgrund der Nebenläufigkeit der zeitlosen Transitionen des Ersatzmodells (Workaround) und der Transitionen innerhalb des Lokomotivengeräte-Teilmodells nicht gewährleistet werden kann, dass das Ersatzmodell vor dem Schalten aller anderen Transitionen ausgewertet wird. In der Folge ruft die Substitution der Inhibitorkanten durch das Ersatzmodell eine Verklemmung des Modells hervor (Deadlock).

Die Portierung des *TimeNET*-Modells in farbige Netze unter Verwendung des Werkzeugs *CPNTools* war daher nicht möglich.

7.4.3 Analyse unter Verwendung einer Monte-Carlo-Simulation

Die Monte-Carlo-Simulation (MC-Simulation) ist ein Verfahren aus der Stochastik, bei dem sehr häufig durchgeführte Zufallsexperimente die Basis darstellen. Auf Basis der Wahrscheinlichkeitstheorie und vor allem des Gesetzes der großen Zahlen wird versucht, analytisch unlösbare Probleme im mathematischem Kontext numerisch zu lösen.

Das Modell des Lokomotiven-Kommunikationsgeräts wurde inklusive des Modells des realen Übertragungskanals per Monte-Carlo-Simulation analysiert. Durch Simulation wurde festgestellt, dass dieses durch erforderliche zeitbehaftete Berechnungen der Plausibilitätsprüfung das begrenzende Glied der Kommunikation darstellt.

¹http://wiki.daimi.au.dk/cpntools-help/inhibitor_arcs.wiki

Monte-Carlo-Modell zur Analyse des Lokomotiven-Kommunikationsgeräts

Für die Modellierung und Validation eines Lokomotivengeräts inklusive einer größeren Anzahl von 1000 Wagengeräten wurde der Kommunikationskanal modelliert und der Markenfluss zwischen den Wagengeräten und dem Lokomotivengerät durch eine entsprechend gewählte Rate von Telegrammen nachgebildet (vgl. Abbildung 7.18). Diese ergibt sich durch Annahme eines Telegrammversands der 1000 Wagen-Kommunikationsgeräte während eines Zeitraums von 15 Minuten im Energiesparmodus bzw. 60 Sekunden im Betriebsmodus „Inauguration“. Die Rate der Kanalbelegung, also die Schaltrate der Transition (ChT1), ergibt sich somit rechnerisch zu $\frac{1000}{900}=1,1$ im Energiesparmodus bzw. $\frac{1000}{60}=16,66$ je Sekunde im Betriebsmodus „Inauguration“.

Theoretisch nutzbar sind für die Übertragung sieben physikalische FHSS-Kommunikationskanäle. In der Realität sind diese durch konkurrierende Funktechnologien im 2,4 GHz-Band nie vollständig nutzbar. Für die Monte-Carlo-Simulation wird angenommen, dass sich die Last auf drei FHSS-Kanäle verteilt. Modelliert ist dies durch die Kapazität des Platzes (ChP3) von $k_{ChP3} = 3$. Eine zeitgleiche Belegung des Kanals mit mehr als k_{ChP3} Telegrammen ist modellgemäß nicht möglich. Die Übertragungsdauer eines Telegramms der Länge 68 Byte entsprechend Abschnitt 6.9.2 ergibt sich bei der Übertragungsrate von 9600 Bit/s rechnerisch zu 56 ms. Unter der Annahme, dass von 1000 Wagen lediglich maximal 35 zu einer Lokomotive gehören, ergibt sich die Wahrscheinlichkeit, dass eine Plausibilitätsprüfung jeweils in maximal 3,5% aller Fälle positiv ausfallen kann.

Für die Analyse des Modells wurde das Werkzeug *II-Tool* eingesetzt.

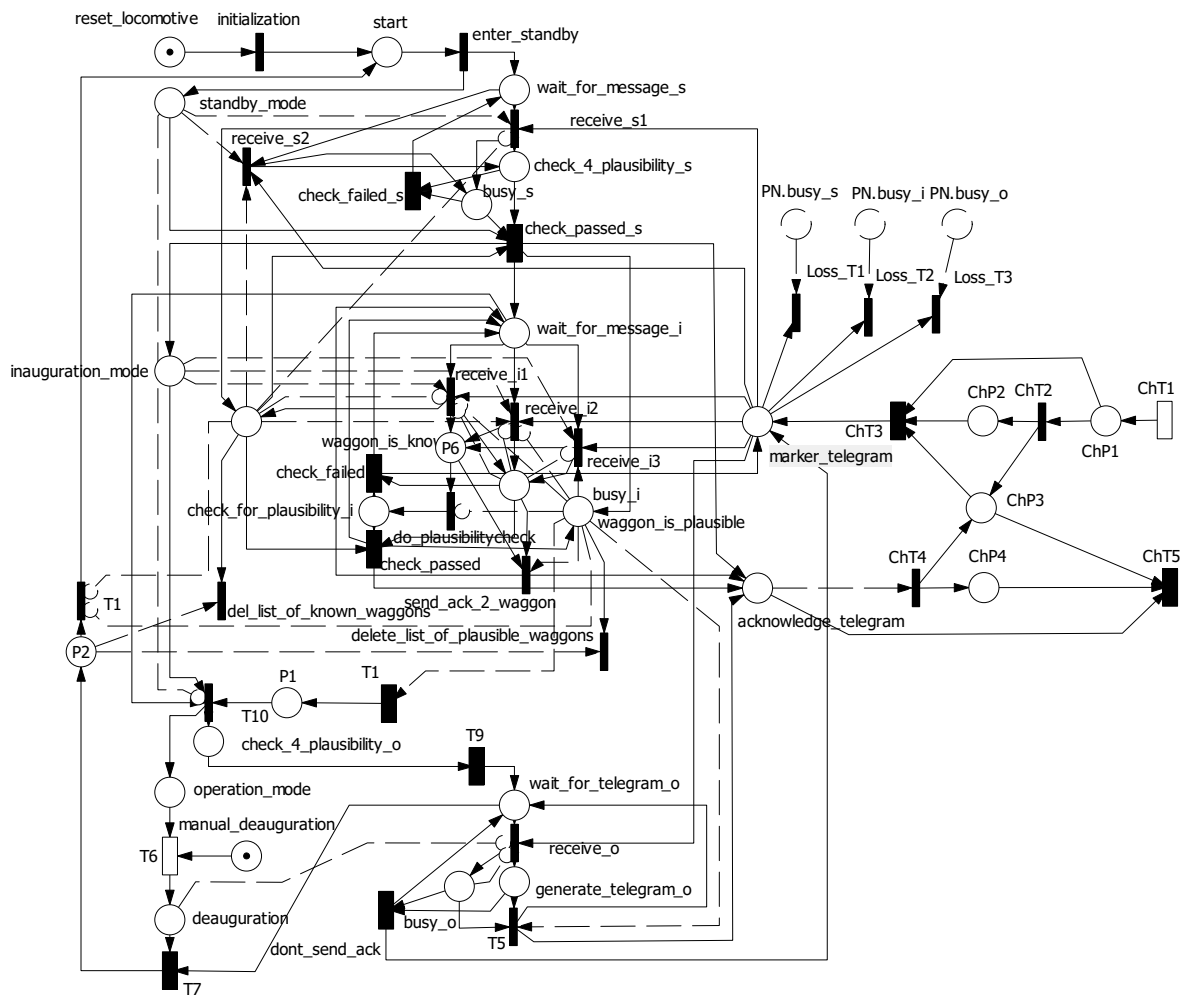


Abbildung 7.18: Modell des Lokomotivengeräts inkl. realem Übertragungskanal zur Monte-Carlo-Simulation

Grenzen der Monte-Carlo-Simulation

Die Modelle machen von dem Beschreibungsmittel der erweiterten, generalisierten, stochastischen Petrinetze Gebrauch. Telegramme von anderen Kommunikationsteilnehmern werden durch Marken abgebildet. Die Grenzen des Modells bestehen in der nicht möglichen Unterscheidung der Marken nach Absender. D.h. sobald der erste Wagen die Plausibilitätsprüfung bestanden hat, so wird das Modell des Lokomotiven-Kommunikationsgeräts jedem empfangenen Telegramm ein Antworttelegramm schicken und somit die im Modell angenommene Buslast erheblich verfälschen. Es wurde daher eine Analyse abhängig vom jeweiligen Betriebsmodus durchgeführt.

Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation

Die Genauigkeit dieser Simulation ist immer nur so genau wie das Modell. Die exakte Nachbildung der Realität ist durch diesen Ansatz aufgrund der fehlenden Nebenläufigkeit und Fahrzeugdynamik nicht erreichbar.

Mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation wurde der Nachweis der Zuverlässigkeit und Korrektheit der Teilmodelle unter den angenommen Randbedingungen des Kanalmodells erbracht und somit die Funktion des Verfahrens zur Businitialisierung sowie des modellierten Zustandsautomaten nachgewiesen. Die Analyse des Modells des Lokomotiven-Kommunikationsgeräts inklusive des Übertragungskanal je Betriebsmodus hat ergeben, dass es zu keinen Telegrammverlusten durch eine Nichtbereitschaft des Kommunikationsgeräts infolge einer aktuell durchgeführten Plausibilitätsprüfung kommt.

Das Wagen-Kommunikationsgerät sendet auf eigene Initiative. Durch Simulationen wurde bestätigt, dass keine Telegrammverluste durch Nichtbereitschaft zu erwarten sind, welche auf Rechenzeiten zurückzuführen wären.

Die Zustandsraumanalyse liefert die in Tabelle 7.3 aufgezeigten Ergebnisse.

TEILNEHMER	P	T	EG	DEADLOCKS
MC: 1 Lok, 0 Wagen realer Kanal	28	32	358	0
MC: 0 Loks, 1 Wagen, realer Kanal	22	25	733	0

Tabelle 7.3: Zustandsraumanalyse mit II-Tool für die Monte-Carlo-Simulation

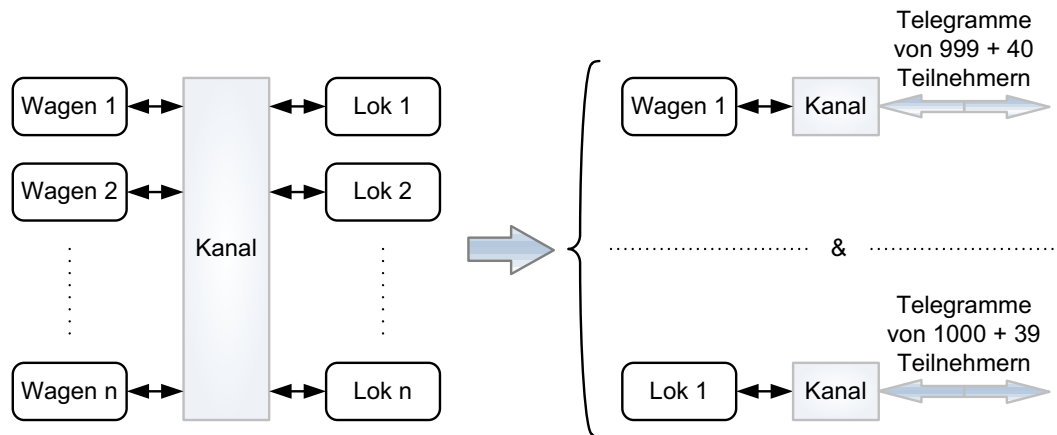


Abbildung 7.19: Analyseansatz für die Monte-Carlo-Simulation unter Verwendung von Petrinetzen

7.4.4 Analysemöglichkeiten des Quellcodes per Monte-Carlo-Simulation

Als Alternative zu den Analyseansätzen des Petrinetzes mittels *CPNTools* oder Monte-Carlo-Simulation entsprechend Abschnitt 7.4.3 wäre eine Monte-Carlo-Simulation der einzelnen Fahrzeuggeräte mittels eines linearen Quellcodes denkbar, der der Funktionalität des jeweiligen Petrinetzmodells entspricht. Dieser Quellcode müsste zuvor händisch implementiert oder automatisch generiert werden, wobei die Codegenerierung aus Petrinetzen in Abschnitt 7.5 noch betrachtet wird.

Für eine Analyse wäre das folgende Vorgehen denkbar:

1. Vervielfältigung des dem Zustandsautomaten und der Programmfunktionen entsprechenden Codes der Teilmodelle für Lokomotiven- und Wagengerät in einer Laufzeitumgebung auf die gewünschte Komplexität, z.B. 1000 Wagengeräte und 40 Lokomotivengeräte.
2. Zusammenfassung der Wagen und Lokomotiven zu Fahrverbänden, d.h. Festlegung der SOLL-Konfiguration der Wagen- und Lokomotivengeräte. Dieses muss vor Beginn der Simulation geschehen, darf jedoch auf diese keinen unmittelbaren Einfluss haben, d.h. die vorhergehende Bildung von Fahrverbänden dient der Nachbildung der GPS-Positionstelegramme für die einzelnen Wagen- und Lokomotivengeräte.
3. Abbildung der Bewegungsdynamik der Fahrzeuge und Mitteilung der Daten an die Fahrzeuge via GPS-Schnittstelle.
4. Stochastische Bewegungen der Fahreinheiten.

5. Modellierung des Übertragungskanals mit entsprechenden Verlustraten.
6. Berücksichtigung der Nebenläufigkeit aller Fahrzeuge, z.B. durch 1040 unabhängige Threads.
7. Simulation eines Zeitraumes von entsprechend z.B. 10 Jahren durch Beschleunigung der Simulationsgeschwindigkeit und Validation der Eigenschaften.

Die gewünschte exakte Abbildung des Kommunikationskanals, der Nebenläufigkeit und der Dynamik von Fahrzeugbewegungen innerhalb eines Bahnhofs wäre möglich durch die objektorientierte Vervielfachung der Fahrzeuggeräte und der exakten Implementierung der Umweltbedingungen sowie der Fahrzeugdynamik (vgl. Abbildung 7.20).

Für die Berücksichtigung des Zustandsautomaten inkl. der Programmfunktionen sowie zusätzlich des Umweltmodells sind Wagen- und Lokomotivengeräte vorab vollständig zu implementieren, d.h. die Analyse würde nicht vor der Implementierung sondern in deren Anschluss durchgeführt werden.

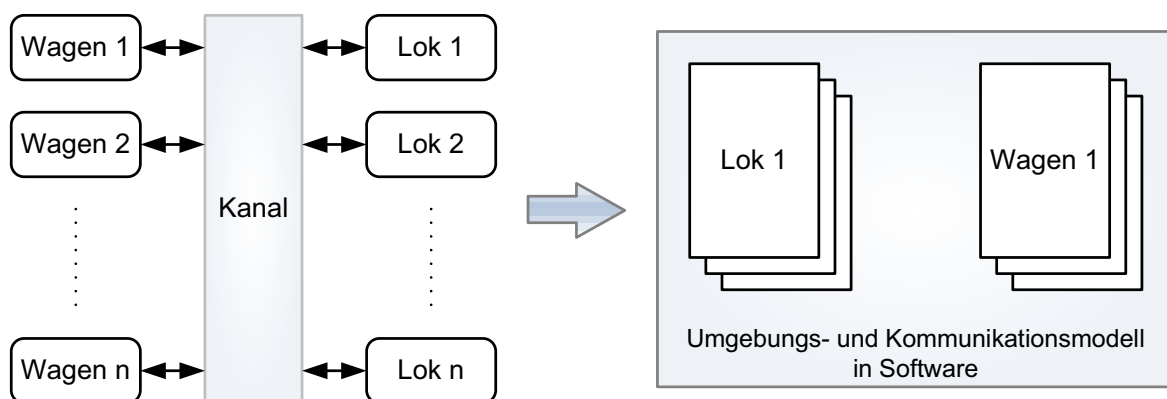


Abbildung 7.20: Analyseansatz für die Monte-Carlo-Simulation unter Verwendung objektorientierter Programmierung

Folgende Nachteile stehen der exakteren Analysegenauigkeit dieses Vorgehens gegenüber:

- die aufwändige objektorientierte Implementierung aufgrund der abzubildenden Nebenläufigkeit der Fahrzeuge zueinander, d.h. in Falle des Beispiels 1040 unabhängige Threads
- die aufwändige Implementierung der Umgebung, d.h. des Übertragungskanals, der Fahrzeugdynamik und der Nebenläufigkeit
- vollständige Implementierung der Zustandsautomaten und der Programmfunktionen für die Analyse
- die stochastische Bewegungsdynamik der virtuellen Fahrverbände im Modell
- die genaue Abbildung der zu erwartenden und bisher unbekannten Telegrammverlusten bei vielen Teilnehmern

Das hier beschriebene Vorgehen wurde nicht weiter verfolgt.

7.4.5 Bewertung der Analysemethoden

In Abbildung 7.21 sind die Vor- und Nachteile der Analyse mittels Monte-Carlo-Simulation (vgl. Abbildung 7.19) in der linken Hälfte sowie die mögliche Analyse der Komplexität des Modells durch Verwendung des aus den Teilmodellen abgeleiteten oder generierten Quellcodes und dessen Verwendung innerhalb einer Laufzeitumgebung (vgl. Abbildung 7.20) in der rechten Hälfte gegenübergestellt.

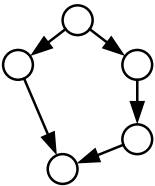
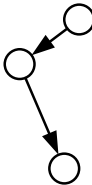
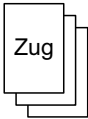
Petrinetz	generierter Code
⊕ Jede Transition entspricht einem Thread	⊖ Begrenzte Anzahl von Threads, bei μC üblicherweise ein Thread
⊕ Der Erreichbarkeitsgraph besitzt mehrere Wege/Äste zu einem Zustand	⊖ Vollständige Implementierung der Zustandsautomaten und der Programmfunktionen bereits vor der Analyse
	⊖ Das Programm wird linear abgearbeitet. Keine Nebenläufigkeit, d.h. nur ein linearer Lösungsweg und der EG wird nicht vollständig abgebildet
⊕ Monte-Carlo-Simulation ist im Π -Tool möglich	
⊖ Modell-Validation	⊖ Monte-Carlo-Simulation nur über objektorientierten Code
⊕ Besserer Nachweis von Deadlocks	
⊕ Petrinetzmodell bildet Algorithmen und Hardware ab und ermöglicht so die Monte-Carlo-Simulation des Modells	⊕ Code-Validation
	⊕ Höhere Genauigkeit, da projektbezogener C/C++-Code validiert wird
	⊕ Höhere Effektivität der MC-Simulation
	⊕ Hardware in the loop

Abbildung 7.21: Bewertung der Analysemethoden mit Monte-Carlo-Simulation

7.5 Softwareintegration und Codegenerierung

Die Modelle der Kommunikationsgeräte für Lokomotiven- und Wagen sowie das sich durch Kombination der Teilmodelle ergebende Gesamtmodell wurden mittels der Werkzeuge *TimeNET 3.0* und *II-Tool* modelliert und simuliert. Es ist erstrebenswert, aus dem validierten Modell einen lauffähigen Quellcode zur Steuerung des Zustandsautomaten der Kommunikationsgeräte, getrennt für Wagen- und für Lokomotivengerät, zu erzeugen. Dies kann entweder durch eine von der Komplexität des Projekts und der Erfahrung des Programmiers abhängige und unter Umständen fehlerträchtige händische Implementierung oder eine automatisierte Quellcodegenerierung erfolgen. Die Vor- und Nachteile eines automatisch generierten Codes wurden bereits in Abschnitt 7.4.5 gegenübergestellt.

Eine direkte Quellcodegenerierung aus dem Werkzeug *TimeNET 3.0* heraus ist nicht möglich.

7.5.1 Ansatz zur Codegenerierung aus Design/CPN

Ein wichtiger Schritt bei der Realisierung des Kommunikationssystems ist die Umsetzung des Modells des Zustandsautomaten in einen Maschinencode, welcher auf dem Mikrocontroller lauffähig ist. Für den in den Kommunikationsgeräten eingesetzten Mikrocontroller vom Typ ATmega128 kann dieser Maschinencode mittels eines AVR-GNU-C-Compilers aus einem C-Code umgesetzt werden (vgl. Abschnitt 7.5.3).

Die automatische Umsetzung der als implementierungsneutrale Petrinetze modellierten Funktionskonzepte und Zustandsautomaten des Kommunikationsgeräte für Wagen und Lokomotiven in ein adäquates Programm wäre ein sinnvoller Schritt in der Entwicklungsphase der Implementierung. Ob dieser Schritt möglich ist oder eine händische Programmimplementierung für das Lokomotiven- und das Wagengerät erforderlich bleibt wurde daher untersucht.

Grundsätzlich ist ein formales Petrinetzmodell für eine Codegenerierung in jeder Programmiersprache geeignet. Dafür sind in [SCHNIEDER 1999] mehrere Möglichkeiten genannt:

1. Für jede Transition des Petrinetzmodells wird ein Stück Programmcode erzeugt, in dem die Vorbedingungen geprüft werden und in dem Fall des Schaltens einer Transition die Änderung der Markierung von Vor- und Nachplätzen durchgeführt wird. Dies ist für Platzkapazitäten von „1“ realisierbar.
2. Für Platzkapazitäten größer „1“ oder zeitbewertete Marken ist die sequenzielle Umsetzung durch die Speicherung dieser Informationen und der Informationen über den aktuellen Zustand des Netzes im Datenbereich sinnvoll. Die Strukturinformation ist direkt im Programmcode enthalten.

3. In der Arbeit von [OBER 1998] wurde ein anderer Ansatz verwirklicht, der als „strukturiert“ bezeichnet wird. Neben der Informationen über den Zustand des Netzes werden auch alle Daten über die Netzstruktur im Datenbereich gespeichert.

An der dänischen Universität Aarhus ist im Rahmen des Projekts „AC/DC“ eine generelle Methode zur automatischen Quellcodegenerierung aus dem Werkzeug *Design/CPN* heraus entwickelt worden [ANDERSEN 1996, MORTENSEN 1999]. Dabei wurde ein System zur Zutrittskontrolle mit dem Werkzeug *Design/CPN* modelliert, simuliert und schließlich über die Beschreibungssprache „Standard ML“ mittels des Interpreters *MLton* in C-Quellcode überführt. Das Vorgehen ist in Abbildung 7.22 dargestellt.

Das Werkzeug *Design/CPN* wurde in der Vergangenheit weiterentwickelt und trägt heute den Namen *CPNtools*. Das in [ANDERSEN 1996, MORTENSEN 1999] beschriebene Vorgehen wurde mittels des weiterentwickelten Werkzeugs nachvollzogen (vgl. Abbildung 7.22). Es war jedoch unklar, ob die Qualität des auf diesem Weg generierten Codes kompatibel zu dem des C-Compilers „AVR-GCC“ ist.

Für die Codegenerierung auf diesem Weg wurde das *TimeNET*-Modell händisch in *CPNtools* portiert. Es zeigte sich, dass das Werkzeug *CPNtools* nicht für die exakte Abbildung des mit dem Werkzeug *TimeNET* entwickelten Petrinetzes geeignet ist (vgl. Abschnitt 7.4.2). Weiterhin zeigte sich, dass eine Inkompatibilität zwischen dem ML-Compiler *MLton* und dem aus dem *CPNtools*-Modell generierten ML-Code besteht.

Eine automatische Codegenerierung war nach dieser Vorgehensweise nicht möglich.

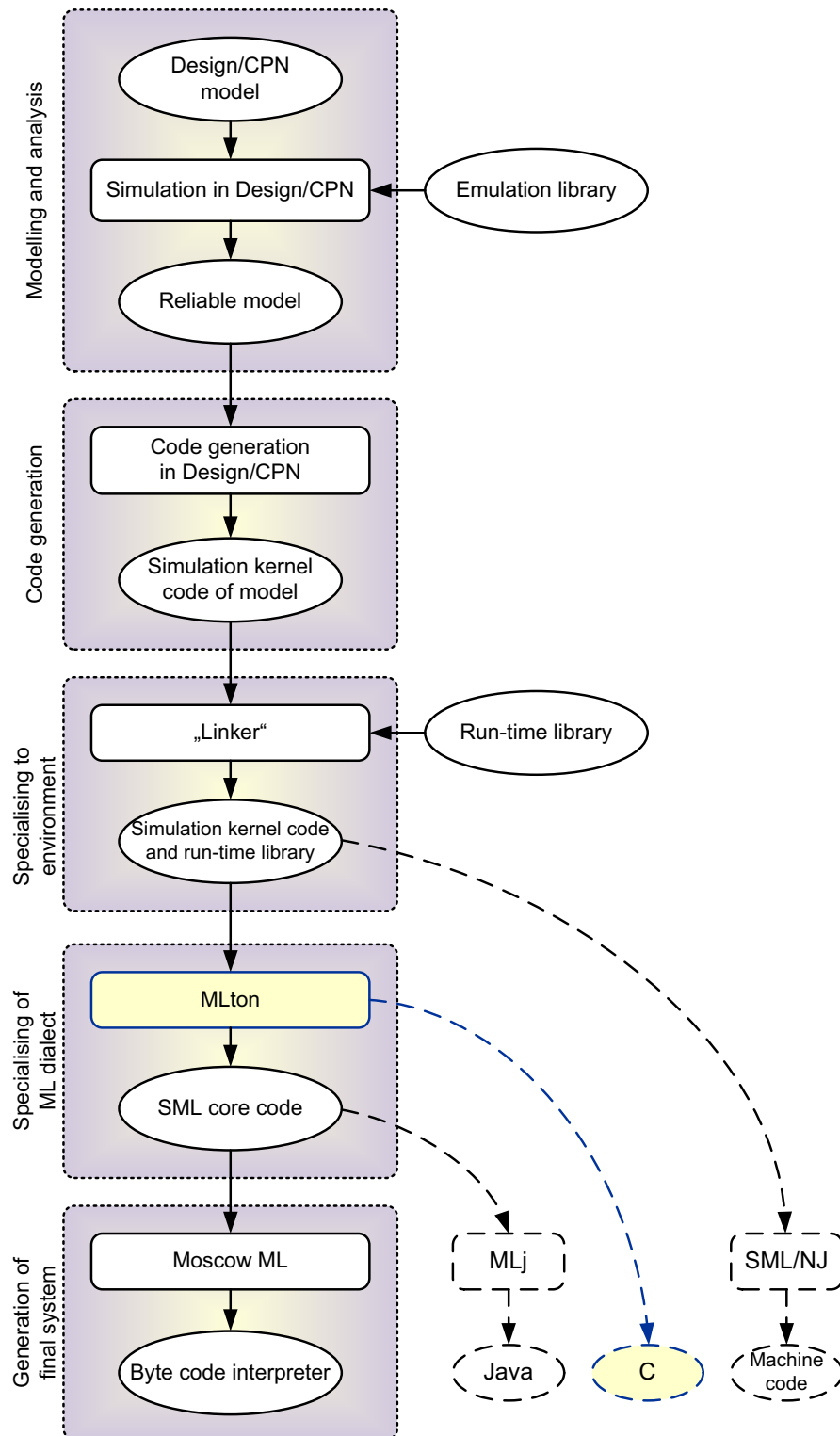


Abbildung 7.22: Übersicht über die im Rahmen des AC/DC-Projekts entwickelten Methoden zur automatischen Codegenerierung

7.5.2 Ansatz zur Codegenerierung aus II-Tool

Etwa zeitgleich zu den Untersuchungen zur automatischen Codegenerierung aus *CPN-Tools* heraus wurde am *IVA* mit der Entwicklung eines eigenen Petrinetz-Werkzeugs begonnen, welches sehr bald auch in der Lage war, C-Code aus Petrinetzmodellen zu generieren. Der Vorteil von *II-Tool* liegt dabei in dem möglichen Import vorhandener *TimeNET*-Petrinetze.

Das Prinzip der Codegenerierung aus einem *TimeNET*- bzw. einem *II-Tool*-Modell ist in Abbildung 7.23 dargestellt.

Der generierte C-Quellcode war unmittelbar als Zustandsautomat in dem Mikrocontroller lauffähig.

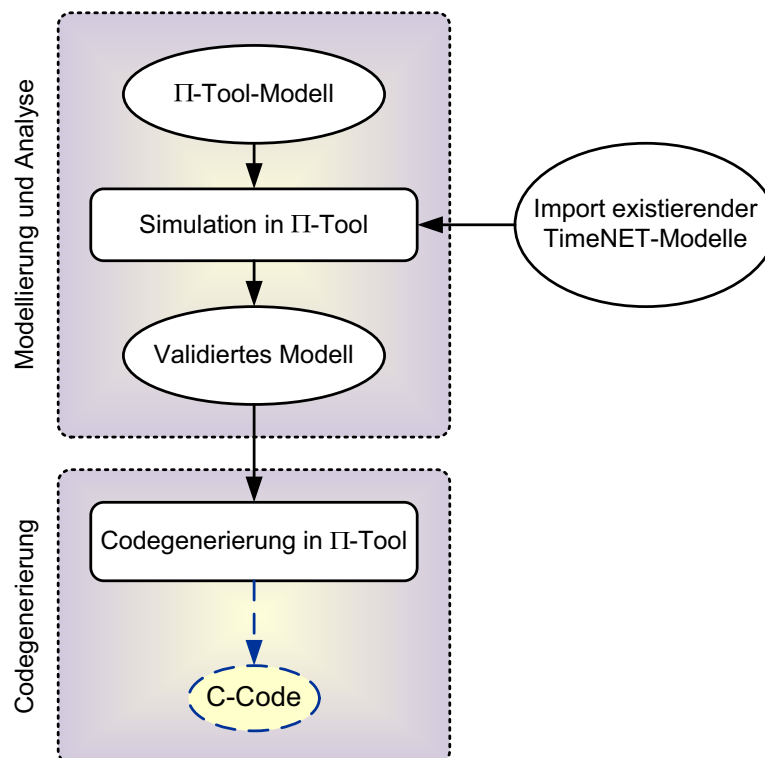


Abbildung 7.23: Vorgehen für die Codegenerierung aus einem TimeNET-Petrinetzmodell

7.5.3 Werkzeuge zur Softwareintegration

Die Softwareentwicklung und -implementierung erfolgt mit dem Werkzeugs *Eclipse* und der Werkzeugsammlung *WinAVR*. Abbildung 7.24 zeigt einen Bildschirmausdruck der Entwicklungsumgebung *Eclipse*. Bestandteil der Werkzeugsammlung *WinAVR* ist die

sog. GNU-Compiler-Collection *AVR-GCC*, ein kostenloser GNU C-Cross-Compiler für AVR-Mikrocontroller², mit dem aus dem C-Quellcode der Maschinencode für den Mikrocontroller erzeugt wurde. Mittels des *ATMEL*-Werkzeugs *AVR-Studio* wurde der kompilierte Code in den Mikrocontroller geladen.

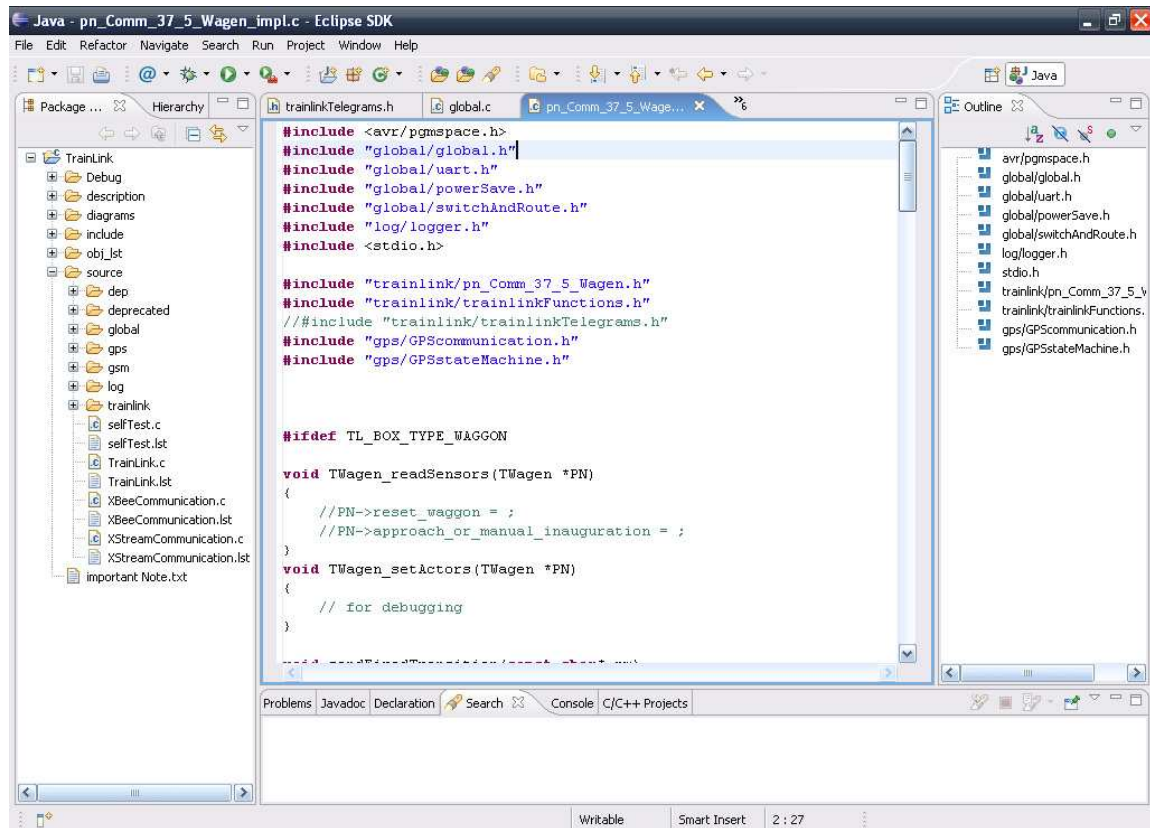


Abbildung 7.24: Screenshot des Workspaces in Eclipse

7.5.4 Softwaredesign und Implementierung

aufgrund unterschiedlicher Zustandsautomaten und Funktionalitäten von Wagen- und Lokomotiven-Kommunikationsgerät (vgl. Abschnitt 7.3) unterscheiden sich die Software der Mikrocontroller des Wagen- und des Lokomotivengeräts. So ist z.B. die Inaugurations- und Plausibilitätsprüfung in den Wagengeräten nicht erforderlich.

Die Unterscheidung, welcher Codeteil für welchen Gerätetyp eingesetzt wird, wird per globaler Konstante `#TL_BOX_TYPE_WAGGON` in der Hauptdatei des Software-Projekts festgelegt. So ist gewährleistet, dass die Zustandsautomaten und Softwarefunktionsblöcke in einem Gesamt-Softwareprojekt zusammengefasst sind, und dass

²<http://www.mikrocontroller.net/articles/AVR-GCC>

durch Setzen einer globalen Konstante der Gerätetyp festgelegt werden kann, dessen Code beim Compilieren der Software generiert wird.

Durch seriell Debuggen des Programmcodes bzw. des Zustandsautomaten wurde die Implementierung des generierten C-Codes und die Lauffähigkeit im Mikrocontroller nachgewiesen. Die Zustandsautomaten sowohl von Wagen- als auch von Lokomotiven-Kommunikationsgerät sind lauffähig.

Resultierend aus den äußeren Randbedingungen des Projektablaufs wurde die Implementierung der in den Anforderungen festgelegten Funktionalität nicht beendet. Die Funktionalitäten, welche von den Zustandsautomaten gesteuert werden, konnten in Teilfunktionen jedoch realisiert werden (Telegrammaufbau, Positionsermittlung, Telegrammversand).

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Die Entwicklung eines Systems ist ein evolutionärer Prozess, dessen Anforderungen immer nur eine Momentaufnahme des aktuellen Standes zu Beginn des Entwicklungsprozesses sein können. Auch im Bereich der Bahnautomatisierung richtet sich der Bedarf am Markt nach dem Angebot und den gebotenen Möglichkeiten. Die innerhalb des Forschungsprojekts INTELFRET erarbeiteten Anforderungen an energieautarke Kommunikationseinrichtungen und deren Lösungsmöglichkeiten sind diese nicht unmittelbar übertragbar. Erweiterte Randbedingungen und daraus resultierende Anforderungen, wie z.B. Verzicht auf Radsatzgeneratoren oder Solarzellen, ergab sich erst im Laufe des Projekts (vgl. Abschnitt 7.1.1).

Die eingangs vorgegebenen globalen Anforderung und rudimentären Randbedingungen wurden analysiert und daraus in Kapitel 3 die spezifischen Produktanforderungen an ein Kommunikationssystem für den Einsatz und die Realisierung einer Kommunikation im Schienengüterverkehr definiert. Dazu wurden bestehende Anforderungen an ein energieautarkes Kommunikationssystem aus Forschungsprojekten, Produktspezifikationen und Patenten adaptiert, angepasst, um neue Anforderungen ergänzt und schließlich in Form einer Dekompositions- sowie in einer Querschnittsdarstellung mit Eigenschaften, Merkmalen und Größen zusammengefasst (vgl. Abschnitte 3.3 und 3.4).

Aus den definierten Eigenschaften und Merkmalen der Anforderungen entstand im Rahmen dieser Arbeit eine Bewertungsmethode für die Beurteilung von Lösungsansätzen und Produkten, welche eine quasi objektive Bewertung durch Einsatz der Bewertungsmethode des *Paarweisen Vergleichs* entsprechend Abschnitt 2.3 zulässt. Anhand dieser Methode wurden Energiewandler und -speicher beurteilt und unter Berücksichtigung von Einsatzszenarien eine Empfehlung für die Realisierung einer Energieversorgung gegeben. Diese Bewertungsmethode wurde ebenfalls bei der Auswahl geeigneter Funkhardware eingesetzt.

Auf Basis der Entwicklungsmethode BASYSNET (BMW-Prinzip, Referenzmodell) wurde die Realisierungsphase in den Abschnitten Hardwarekonzept, Softwarekonzept und Kommunikationskonzept bearbeitet und theoretisch gelöst.

Das Kommunikationskonzept wurde mit Hilfe des Beschreibungsmittels EGSPN unter Nutzung der Werkzeuge *TimeNET v3.0* und *II-Tool* modelliert und analysiert, und es beinhaltet die Ermittlung der zu einem Zugverband gehörenden Fahrzeuge sowie deren Reihung. Aufgrund der Beschränkungen des Energiebedarfs wurde eine einfache Topologie ausgewählt, die jedoch keine redundante Funkverbindungen berücksichtigt.

Die Analyse des Modells und Nachbildung hochdimensionaler Extremfälle in einem Zugbildungsbahnhof, mit z.B. 1000 Wagen und 40 Lokomotiven, sowie der Umweltbedingungen konnte durch die Methode der Monte-Carlo-Simulation mittels der Petri-netzteilmodelle von Wagen- und Lokomotivgerät durchgeführt werden (vgl. Abschnitt 7.4.3).

8.2 Ausblick

Das Inaugurationskonzept sowie die Erprobung wurden aufgrund der äußeren Bedingungen des Projektablaufs nicht im praktischen Einsatz innerhalb des realen Bahnumfelds nachgewiesen.

Für eine Risikominimierung im Falle einer Serienproduktion dieser Kommunikationseinrichtungen kann eine quellcodebasierte Monte-Carlo-Simulation inkl. der Entwicklung und Implementierung eines Umweltmodells und der Fahrzeugdynamik entsprechend Abschnitt 7.4.4 realisiert und durchgeführt werden.

Die Entwicklung und Implementierung eines Umweltmodells ist dabei ein weiterer komplexer Ansatz, welcher nicht weiter vertieft wurde. Doch auch wenn die notwendigen Vorarbeiten für diese Analyse durch vollständige Implementierung der Kommunikationsgeräte für Wagen und Lokomotive sowie zusätzlich des Kanals, des dynamischen Verhaltens und des Umweltmodells den eigentlichen Implementierungsaufwand übersteigen, so wäre es nur mit dieser Analysemethode möglich eine exakte Analyse durchzuführen und eine Aussage über das dynamische Verhalten von 1000 Wagen- und 40 Lokomotiven-Kommunikationsgeräten zu treffen.

Gegenstand weiterer Untersuchungen könnte ferner, zur Steigerung der Verfügbarkeit und Übertragungszuverlässigkeit, die Adaption redundanter Verbindungen in die bestehende Topologie und die Entwicklung und Optimierung eines zugehörigen Algorithmus für ein Telegrammrouting sein, welcher der Forderung nach Energiebedarfsminimierung und einer Erhöhung der Ausfallsicherheit gerecht wird.

Anhang A

Petrinetze

In diesem Kapitel werden verschiedene Arten von Petrinetzen sowie Analyse- und Bewertungsmethoden vorgestellt, mit denen das Systemverhalten und das Kommunikationskonzept modelliert und bewertet werden kann. Aufgrund der relativ kompakten Modellierung der Teilnetze von Wagen- und Lokomotivgerät wird auf die Einführung hierarchischer Petrinetze verzichtet.

A.1 Petrinetze als Beschreibungsmittel

Petrinetze sind in ihrer anschaulichen Darstellung bipartite graphische Strukturen, d.h. Graphen, welche aus Knoten sowie Transitionen gebildet werden. Diese sind über gerichtete und gewichtete Kanten (Pfeile) verbunden. Knoten werden auch als Stellen oder Plätze bezeichnet und dargestellt durch Kreise oder Ellipsen. Transitionen werden als Rechtecke oder Balken visualisiert. Die Dynamik in Petrinetzen wird durch Marken (Token) in den Plätzen elementar dargestellt. Marken stellen die Existenz eines Zustandes dar, d.h. eine Markierung ordnet einem Platz des Netzes eine natürliche Zahl zu. Eine Markierung ist so lange gültig, wie Marken auf dem Platz liegen. Ein durch den Platz definierter, möglichst diskreter Zustand wird durch seine Markierung gültig oder existent. Die Stellen eines Petrinetzes stellen also „Speicher“ dar, deren Elemente über die Kanten bei dem Schalten einer Transition verschoben werden. Die gesamte Verteilung aller Marken auf den Stellen wird als Markierung bezeichnet.

Ein sehr einfaches Beispiel eines Stellen-Transitions-Petrinetzes zeigt Abbildung A.1. Die Kapazität der Plätze sowie das Kantengewicht beider Kanten beträgt „1“.

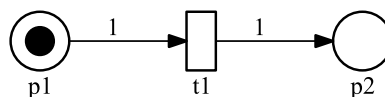


Abbildung A.1: Grundstruktur eines einfachen Petrinetzes

A.1.1 Stellen-Transitions-Netze

Bei Stellen-Transitions-Netzen (STN) wird den Plätzen eine positive ganze Zahl k (Kapazität) zugeordnet. Die Platzkapazität gibt an, wie viele Marken sich maximal gleichzeitig auf einer Stelle befinden dürfen. Genauso wird den Kanten ein sogenanntes Kantengewicht w zugeordnet. Dieses gibt an, wie viele Marken beim Schalten der entsprechenden Transition über die Kante fließen müssen. In Abbildung A.2 besitzt der Platz p_1 die Kapazität $k = 2$, die Plätze p_2 und p_3 die Kapazität $k = 1$. Alle Kanten besitzen das Gewicht $w = 1$. Wird die Kapazität oder das Gewicht nicht explizit angegeben, so ist sie eins. Beim Schalten der Transition t_1 wird jeweils eine Marke von den Plätzen p_1 und p_2 abgezogen und eine Marke auf p_3 platziert, da das Kantengewicht der Kante zwischen t_1 und p_3 eins ist. Wäre das Gewicht dieser Kante und die Kapazität von p_3 größer, so würden zwei Marken auf p_3 platziert.

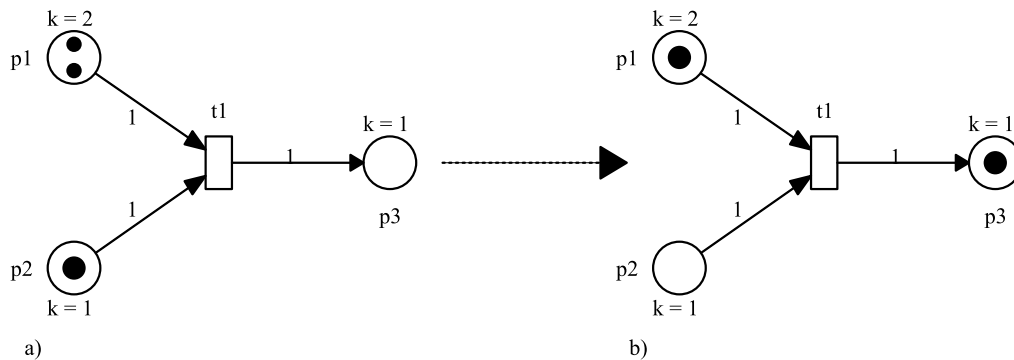


Abbildung A.2: Schalten eines Stellen-Transitions-Netzes

Alle Plätze, von denen beim Schalten einer Transition Marken abgezogen würden, werden als Vorbereich der Transition bezeichnet. Der Vorbereich der Transition t_1 besteht aus den Plätzen p_1 und p_2 . Entsprechend werden Plätze, auf denen eine Transition Marken ablegt, als Nachbereich bezeichnet. Eine Transition ist dann schaltfähig, wenn die Plätze des Vorbereichs so viele Marken enthalten, wie über die entsprechenden Kanten abgezogen werden, und wenn alle Plätze im Nachbereich genug Kapazität haben, um zusätzlich zu den vorhandenen Marken eine dem Kantengewicht entsprechende Anzahl von Marken aufzunehmen. Im Beispiel der Abbildung A.2 wäre t_1 in a) schaltfähig, in b) hingegen nicht.

A.1.2 S/T-Petrinetze mit Test- und Verbotskanten

Bei der Modellierung des Kommunikationskonzepts wird auch Gebrauch von speziellen Kanten gemacht. Es handelt sich dabei um Testkanten und Inhibitor-kanten (vgl. Abbildung A.3). Für das Systemmodell tragen Testkanten keine Marken, d.h. es wird

lediglich die Belegung eines Platzes abgefragt und bei Belegung das Schalten einer Transition ermöglicht. Testkanten können auch gewichtet sein. In der Softwareentwicklung entspricht dies einer if-then-do-Konstruktion. Das Komplement dazu bilden Inhibitor-kanten. Falls ein Platz belegt ist, so darf eine entsprechende Transition nicht schalten. Auch Inhibitor-kanten können gewichtet sein, d.h. dass eine Transition nur dann gehemmt würde, wenn der Platz mit einer Mindestkapazität belegt ist. Wie in Abbildung A.3 a) zu sehen ist, ist der Vorbereich der Transition t_1 erfüllt. Der Platz p_2 ist über eine Testkante mit t_1 verbunden. Der Platz p_3 hingegen mit einer Verbotskante, die jedoch nur dann das Schalten hemmt, wenn p_3 mit mindestens zwei Marken belegt ist. Von dem Platz p_1 werden nun zwei Marken abgezogen, die Marken auf p_2 und p_3 bleiben erhalten. Der Platz p_4 wird mit den zwei Marken von p_1 gefüllt, da die Kapazitäten der Plätze und die Kantengewichte entsprechend gewählt wurden. Im Beispiel der Abbildung A.3 wäre t_1 in a) schaltfähig, in b) hingegen nicht.

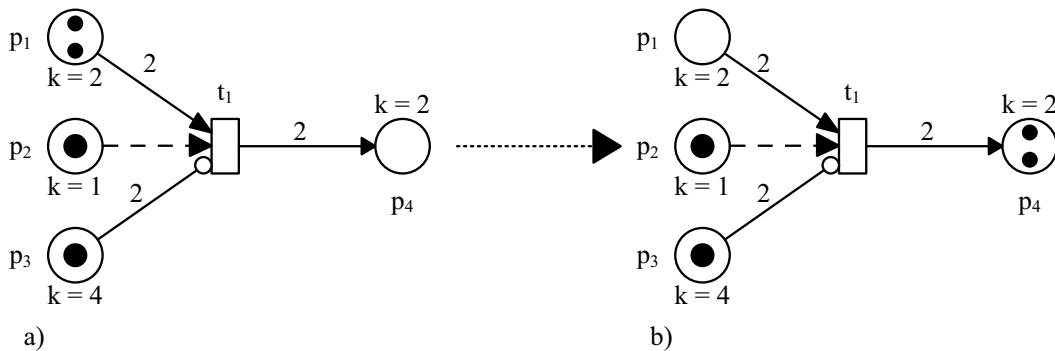


Abbildung A.3: S/T-Netze mit Test- und Verbotskanten

A.1.3 Determinierte zeitbewertete Petrinetze

Besonders für ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen ist es gemäß des vierten Systemaxioms „Temporalität“ zweckmäßig, zeitliche Aspekte speziell in Petrinetzen zu modellieren.

Petrinetze ermöglichen die Modellierung von zeitlichen Vorgängen der Prozesssteuerung, der Signalverzögerung und der Definition von Schaltzeitpunkten sowie die Untersuchung der zeitlichen Synchronisation von nebenläufigen Aktivitäten. Grundsätzlich besteht in einem Petrinetz die Möglichkeit, jedes der vier Grundelemente Platz, Transition, Kante und Marke zeitbewertet darzustellen. Viele der daraus resultierenden Konzepte zur Integration von Zeiten können ineinander überführt werden. Da in dieser Arbeit nicht die Analyse mit Hilfe der linearen Algebra im Vordergrund steht, kommt lediglich eine der fünf Zeitbewertungsformen von Petrinetzen - die Schaltverzögerung - zur Anwendung. Dabei wird das Schalten einer Transition nach Erreichen der kausalen Schaltbedingungen so lange verzögert, bis die deterministische Zeitkonstante t_n verstri-

chen ist. Während des Aktivierungszustands bleiben die Marken auf den Vorplätzen der aktivierten Transition sichtbar.

A.1.4 Stochastische Petrinetze

Häufig lässt sich das zeitliche Verhalten realer Systeme nicht durch den ausschließlichen Gebrauch deterministisch zeitbewerteter Transitionen modellieren. Die zeitliche Verweildauer einer Marke auf einem Platz kann z.B. nicht genau vorherbestimmt werden, wobei jedoch aufgrund vorher gemachter Beobachtungen oder Annahmen auf eine Häufigkeitsverteilung zurückgegriffen werden kann. Je nach Art werden verschiedene Verteilungsarten, wie z.B. Gleich-, Negativ-Exponential- oder Gaussverteilung, verwendet. Determinierte Zeitbewertungen können mit isochroner Verteilung als Spezialfall einbezogen werden (vgl. Abbildung A.4). Die Schaltrate der Transition folgt der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung. Der Einsatz von stochastischen Petrinetzen (SPN) stellt eine effektive Möglichkeit zur Abbildung realer Systeme dar und ermöglicht so eine Verlässlichkeitsmodellierung und -analyse.

Sind die Schaltzeiten nicht exponentiell verteilt, so sind stochastische Prozesse mit Hilfe von SPN modellierbar. Im allgemeinen Fall kann man das SPN-Modell anhand von Simulationen untersuchen, was ein Sonderfall der Monte-Carlo-Simulation darstellt, oder auf eine gewichtete Summe von Exponentialverteilungen zurückzuführen ist. Die grafische Darstellung ist jedoch intuitiv.

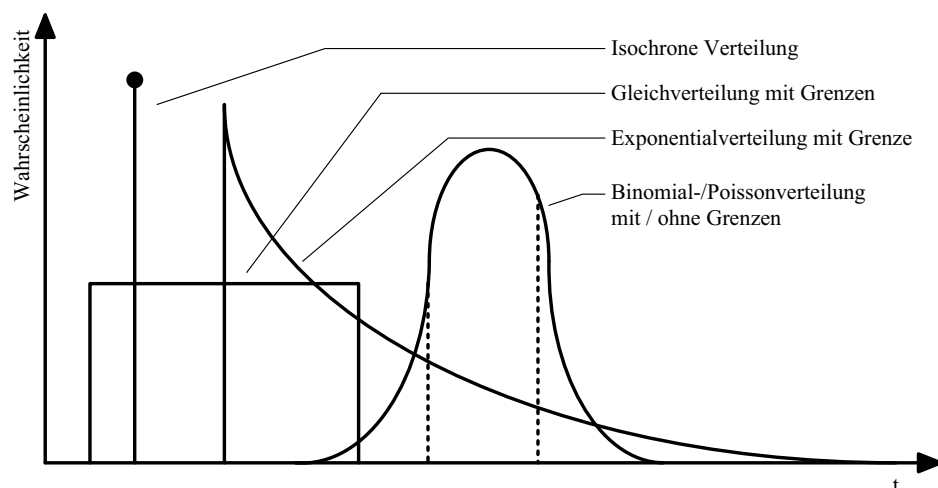


Abbildung A.4: Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen

A.2 Analysemethoden von Petrinetzmodellen

Ausgehend von einer definierten Initialmarkierung des Petrinetzes wird durch das Schalten einer schaltfähigen (feuerbaren) Transition die nächste Folgemarkierung des Petrinetzes markiert usw. Bei dynamischen Konflikten wären alternative Folgemarkierungen denkbar, bei Nebenläufigkeiten existieren unterschiedliche Reihenfolgen. Alle Folgemarkierungen bzw. Transitionsfolgen, die von einer Initialmarkierung aus erreicht werden können, bilden den Erreichbarkeitsgraphen eines Petrinetzes, der somit die vollständige Dynamik des Petrinetzes explizit darstellt.

A.2.1 Erreichbarkeitsanalyse

Der Graph der Menge aller von der Initialmarkierung eines Petrinetzes erreichbaren Markierungen und schaltbaren Transitionen wird als Erreichbarkeitsgraph (*EG*) bezeichnet. Die erreichbaren Markierungen stellen die nummerierten Knoten des Erreichbarkeitsgraphen dar, die schaltbaren Transitionen werden als Kanten dargestellt. Der *EG* kann sowohl graphisch als auch tabellarisch dargestellt werden.

Der Erreichbarkeitsgraph dient z.B. der Analyse des Modells auf Lebendigkeit des Modells mit einer gegebenen Anfangsmarkierung. Ebenfalls lassen sich die Reversibilität und die Beschränktheit des Netzes nachweisen oder widerlegen. Erreichbarkeitsgraphen lassen sich nur für beschränkte Netze vollständig berechnen. Für unbeschränkte Netze würde der Erreichbarkeitsgraph unendlich groß werden, kann aber gegebenenfalls durch sog. Überdeckbarkeitsgraphen erfasst werden.

Mit Hilfe der Erreichbarkeitsanalyse können folgende Eigenschaften untersucht werden:

- **Reversibilität** - Ein Petrinetz heißt reversibel, wenn die Initialmarkierung durch eine spezielle Schaltfolge wieder erreichbar ist. Die dabei erreichbaren Markierungen bilden einen Zyklus im Erreichbarkeitsgraphen.
- **Tote Transition** - Eine Transition t_i heißt tote Transition, wenn sie weder in der Initialmarkierung noch in einer Folgemarkierung aktiviert wird.
- **Tote Markierung** - Eine Markierung heißt tot, wenn sie keine Transition mehr aktiviert, d.h. sie ist ein Endknoten im Erreichbarkeitsgraphen.
- **Verklemmung** - Es wird zwischen partieller und totaler Verklemmung unterschieden. Wenn keine Transition mehr schalten kann, so liegt eine totale Verklemmung vor. Ist nicht mehr jede Transition, die vorher schaltbar war, von einem aktuellen Zustand aus aktivierbar, sondern nur noch eine Teilmenge, so liegt eine partielle Verklemmung vor.

- **Deadlock** - Ein Deadlock ist eine Stellenmenge, deren Vorbereich eine Teilmenge des Nachbereichs ist.
- **Trap** - Ein Trap ist eine Stellenmenge, deren Nachbereich eine Teilmenge des Vorbereichs ist.

A.2.2 Software-Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit der Software trägt bei der Systementwicklung essentiell zur Systemzuverlässigkeit bei. Im Vergleich zur hardwareorientierten Zuverlässigkeitstechnik ist die Technik der Softwarezuverlässigkeit bisher weniger ausgereift, da Softwaresysteme hinsichtlich des Versagensverhaltens andersartige Eigenschaften aufweisen als Hardwaresysteme. Hardwaresysteme können anhand der definierten Lasten (Requirements) verifiziert und validiert werden, so dass eine Aussage zur Zuverlässigkeit möglich ist [BITSCH 2006, LIGGESMEYER 2000].

Die Fehler der Software können in Entwurfs- und Implementierungsfehler unterschieden werden, die unter bestimmten Bedingungen zum Versagen der Software führen können. Per Modellbildung und Simulation besteht die Möglichkeit, das Softwaresystem bereits vor der Implementierung auf Zuverlässigkeit zu untersuchen. Entgegen der klassischen Softwareentwicklung nach dem Rational Unified Process (*RUP*) wurde in dieser Arbeit eine über ein Modell und eine Simulation validierte Software entwickelt. Dies hat den Vorteil, dass die Validation bereits vor der Implementierung erfolgen kann und so eine zeitaufwändige Fehlersuche während der Implementierungsphase entfiel. Ideal wäre die Generierung einer Software aus dem validierten Systemmodellen (vgl. Abschnitt 7.5).

A.2.3 Analysemethoden der Verlässlichkeit

Für die Verlässlichkeitsanalyse können verschiedene Methoden, wie z.B. die kombinatorische Methode der Fehlerbaumanalyse, stochastische Petrinetze oder die Monte-Carlo-Simulation eingesetzt werden. Die Monte-Carlo-Simulation stellt eine alternative Methode zu den analytischen Methoden dar, wobei keine komplexen mathematischen Analysen erforderlich sind. Die Verlässlichkeitsgrößen werden durch Simulation des Systemmodells ermittelt. Beschränkungen der Verteilungen sind bei der Monte-Carlo-Simulation nicht nötig, so dass theoretisch alle Aspekte in die Analyse einbezogen werden können (vgl. Abschnitt 7.4).

Die Ausfallereignisse genügen stochastischen Verteilungsfunktionen. Bei der Simulation werden zufällige Variablenwerte der Verteilungen generiert und der reale stochastische Prozesse simuliert. Die Beobachtung der wiederholt simulierten Prozesse ermöglicht die Abschätzung der betrachteten Größen, wie z.B. Erwartungswert, mittlere Verfügbarkeit, Anzahl der Ausfälle usw. [FISHMAN 1996, RIPLEY 1987].

Literaturverzeichnis

- [(AAR) 1999a] (AAR), ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS (1999a). *Intra-Train Communication Specification For Radio-Based Freight Train Control Systems*. <http://www.aar.com/ttci/recp/4330.htm>. Rev. 0.0 DRAFT.
- [(AAR) 1999b] (AAR), ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS (1999b). *Operation Interface Standard Specification For The Intra-Train Communication Unit (ITCU)*. <http://www.aar.com/ttci/recp/4340.htm>. Rev. 0.3 DRAFT.
- [(AAR) 1999c] (AAR), ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS (1999c). *Performance Specification For Freight Car Axle Mounted Power Generator Systems*. <http://www.aar.com/ttci/recp/4320.htm>. Rev. 5.3 DRAFT.
- [(AAR) 2000] (AAR), ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS (2000). *Performance Requirements For Electronically Controlled Pneumatic (ECP) Radio-Based Freight Brake Systems*. <http://www.aar.com/ttci/recp/4300.htm>. Rev. 0.5 draft 'f'.
- [(AAR) 2002] (AAR), ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS (2002). *Teleconference/Meeting Schedule RECP Brake Specification Development Process*.
- [AECA 1996] AECA (1996). *Montage- und Betriebsanleitung für den Solarladeregler*. Aeca Batterieladesysteme und Präzisionselektronik GmbH.
- [ALLES 1999] ALLES, H. (1999). *Marktstudie Schienengüterverkehr*. SCI Verkehr GmbH im Auftrag des Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand, Technologie und Verkehr des Landes NRW.
- [ANDERSEN 1996] ANDERSEN, T. (1996). *SECU-DES - Improved Methodology For The Design Of Communication Protocols In Security Systems (v2) - ESSI-Project 10937*. Abschlussbericht, Dalcotech A/S.
- [ATMEL 2006] ATMEL (2006). *ATmega128*. ATMEL.
- [BACHEM] BACHEM, FIRMA. *Datenblatt Neigungsschalter 15° CW 1300*. E. Bachem GmbH & Co. KG.
- [BALANIS 2005] BALANIS, C. A. (2005). *Antenna Theory*. Wiley-Interscience.

- [BALZERT 1998] BALZERT, H. (1998). *Lehrbuch der Software-Technik. Software-Management, Software-Qualitätssicherung, Unternehmensmodellierung*. Nr. ISBN 3-8274-0065-1. Spektrum Akademischer Verlag, Band 1 Aufl.
- [BARANEK 2001] BARANEK, M. (2001). *Telematiksysteme im schienengebundenen Gefahrguttransport*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)*, Nr. 4, S. 218–223.
- [BENZ 2002] BENZ, J. (2002). *Energiemanagement für autonome Photovoltaik-Systeme*. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg.
- [BIELEFELD et al. 2002] BIELEFELD, J., L. BIELEFELD, W. TALKE und T. WIEMERS (2002). *DE 100 45 810*.
- [BIKKER und BOCK 1999] BIKKER, G. und U. BOCK (1999). *Einsatz eines Prozeßmodells zur Analyse und Spezifikation von Bussystemen*. EKA Tagung, S. 509 – 526.
- [BITSCH 2006] BITSCH, F. (2006). *Verfahren zur Spezifikation funktionaler Sicherheitsanforderungen für Automatisierungssysteme in Temporallogik*. Dissertation, Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik der Universität Stuttgart.
- [BLUERADIOS 2004] BLUERADIOS (2004). *Produktdatenblatt der Bluetooth Module BR-C30 der Firma BlueRadios*.
- [BOCK 2001] BOCK, U. (2001). *Betriebs- und Kommunikationskonzept für dynamische Rendezvous-Manöver von Zügen*. Dissertation, TU Braunschweig.
- [BOEHM 1988] BOEHM, BARRY W. (1988). *A Spiral Model of Software Development and Enhancement*.
- [BRUNS 2002] BRUNS, W. (2002). *Vorlesungsskripten - Codierungstheorie und Kryptographie*. Osnabrücker Schriften zur Mathematik.
- [CHIP45.COM 2005] CHIP45.COM (2005). *Crumb128 v2.0*. chip45.com.
- [CORDIS 2000] CORDIS (2000). *INTELFRET- Final Summary Report*.
- [CPN-GROUP 2007] CPN-GROUP (2007). *CPNTools - Computer Tool for Coloured Petri Nets*.
- [EN50121-3-1 2001] EN50121-3-1 (2001). *Bahnanwendungen - Elektromagnetische Verträglichkeit - Teil 3-1: Bahnfahrzeuge; Zug und gesamtes Fahrzeug*. EN50121-3-2:2000. gültig.
- [EN50121-3-2 2001] EN50121-3-2 (2001). *Bahnanwendungen - Elektromagnetische Verträglichkeit - Teil 3-2: Bahnfahrzeuge; Geräte*. EN50121-3-2:2000. gültig.

- [EN50155 2001] EN50155 (2001). *Bahnanwendungen - Elektronische Einrichtungen auf Schienenfahrzeugen (EN50155-2001 + A1:2002 + Corrigendum 2003)*. EN50155:2004-01-01. gültig.
- [EN50159-1 2003] EN50159-1 (2003). *Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme, Teil 1 - Sicherheitsrelevante Kommunikation in geschlossenen Übertragungssystemen*. EN50159-1:2001. gültig.
- [EN50159-2 2002] EN50159-2 (2002). *Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme, Teil 1 - Sicherheitsrelevante Kommunikation in offenen Übertragungssystemen*. EN50159-2:2001. gültig.
- [EN60721-3 2003] EN60721-3 (2003). *Klassifizierung von Umweltbedingungen - Teil 3: Klassen von Umwelteinflussgrößen und deren Grenzwerte; Einführung (IEC 60721-3-0:1984 + A1:1987)*. EN60721-3-0:1993. gültig.
- [EN60721-3-5 2001] EN60721-3-5 (2001). *Klassifizierung von Umweltbedingungen - Teil 3: Klassen von Umwelteinflussgrößen und deren Grenzwerte; Hauptabschnitt 5: Einsatz an und in Landfahrzeugen (IEC 60721-3-5:1997)*. EN60721-3-5:1997. gültig.
- [EN61373 1999] EN61373 (1999). *Bahnanwendungen - Betriebsmittel von Bahnfahrzeugen - Prüfungen für Schwingen und Schocken (IEC 61373:1999)*. EN61373:1999. gültig.
- [EN62280-2 2003] EN62280-2 (2003). *Bahnanwendungen - Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme - Teil 2: Sicherheitsrelevante Kommunikation in offenen Übertragungssystemen*. EN 62280-2. gültig.
- [ENOCEAN 2007] ENOCEAN (2007). *Produktdatenblatt*.
- [ETSI 2003a] ETSI (2003a). *ETSI EN 300 175-1 - Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT) - Part 1: Overview*. v1.7.0 Aufl.
- [ETSI 2003b] ETSI (2003b). *ETSI EN 300 175-2 - Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT) - Part 2: Physical Layer*. v1.7.0 Aufl.
- [ETSI 2003c] ETSI (2003c). *ETSI EN 300 175-3 - Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT) - Part 3: Medium Access Control Layer*. v1.7.0 Aufl.
- [FISHMAN 1996] FISHMAN, G. S. (1996). *Monte Carlo: concepts, algorithms and applications*. Springer-Verlag, 1st Aufl.
- [SUPERWIND GMBH 2004] GMBH SUPERWIND (2004). *Benutzerhandbuch für das „superwind sw 350“ Windrad*. superwind GmbH, Brühl.
- [HASHEMI 1993] HASHEMI, H. (1993). *The Indoor Radio Propagation Channel, Proc. of the IEEE*. Bd. 81, S. 943 – 968.

- [HECHT 1999] HECHT, M. (1999). *Diagnose- und Telematikkonzepte für den Schienengüterverkehr: Bericht Nr. 7/99*. Technischer Bericht, FB 10 Verkehrswesen und angewandte Mechanik, TU Berlin, TU Berlin FG Schienenfahrzeuge Sekr. SG 14 Salzufer 17-19 D-10587 Berlin.
- [HECHT et al. 1999] HECHT, M., M. JANIK, T. RIECKENBERG und D. SALZ (1999). *Telematik im Schienengüterverkehr - Anwendung bei Gefahrguttransporten*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)*, Nr. 12, S. 837–849. FG Schienenfahrzeuge, TU Berlin, Prof. Dr.-Ing. M. Hecht.
- [HECHT und RIECKENBERG 2002] HECHT, M. und T. RIECKENBERG (2002). *Telematik*. In: *Machbarkeitsstudie Individualisierter Schienengüterverkehr (IVSGV)*, Bd. XV. TU Berlin, FG Schienenfahrzeuge, Prof. Dr.-Ing. M. Hecht.
- [HEINEN 1983] HEINEN, E. (1983). *Industriebetriebslehre*. E. Heinen, 7 Aufl.
- [HEINZE und MAYER 1999] HEINZE, R. und S. MAYER (1999). *Unterbrechungsfreie Stromversorgung - Technik, Trends, Anwendungen*. Technischer Bericht, VDE-Verlag Berlin Offenbach.
- [HOLUX 2005] HOLUX (2005). *Holux GR-213*. Holux.
- [IHLENFELD 2004] IHLENFELD, J. (2004). *UWB: Die drahtlose Zukunft von USB und FireWire*. World Wide Web.
- [ISO15909-1:2004 2004] ISO15909-1:2004 (2004). *Software and Systems Engineering - High-level Petri Nets - Part 1: Concepts, definitions and graphical notation*. ISO Standard.
- [JASMER et al. 2004] JASMER, U., S. STEINBERG und J.-U. VARCHMIN (2004). *Datenübertragungseinrichtungen für einen Wagenverbund - EP 1 465 358 A2*. EP 1 465 358 A2.
- [KARL 1984] KARL, H. (1984). *Photovoltaische Systeme - Grundlagen zur Dimensionierung und zum Betrieb*. Dissertation, Universität Braunschweig.
- [KBST 2006] KBST (2006). *Das V-Modell XT Release 1.2*. Bundesministerium des Innern.
- [KIEFER 1995] KIEFER, J. (1995). *Methodische Partitionierung und Parametrierung von Feldbussen*. Dissertation.
- [KIRSTEIN 1994] KIRSTEIN, H. (1994). *Qualitätsmanagement im Unternehmen: Philosophie - Strategie - Methode, Die Hohe Schule des Total Quality Management*. G. F. Kaminske.

- [KUPKE 2006] KUPKE, T. (2006). *Entwurf eines funkbasierten Zugbussystems zur Nachrichtenübertragung*. Unveröffentlichter Beitragsentwurf.
- [KUPKE et al. 2007] KUPKE, T., E. SCHNIEDER, P. FAUBEL, W. WINDOLF und H. HEIKE (2007). *Verfahren zur automatischen Inauguration eines Funkbusses zum Informationsaustausch in Fahrverbänden*. Erfindungsmeldung - Siemens Aktenzeichen 2007P15387 DE.
- [LAUKAMP 2002] LAUKAMP, H. (2002). *IEA Reliability Study of Grid Connected PV Systems - Field Experience and Recommended Design Practice*. Report IEA-PVPS T7-08: 2002, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg.
- [LIGGESMEYER 2000] LIGGESMEYER, P. (2000). *Qualitätssicherung softwareintensiver technischer Systeme*. Spektrum-Verlag. ISBN 3-8274-1085-1.
- [MAXSTREAM 2005] MAXSTREAM (2005). *Produktbeschreibung für das RF-Modem "24XStream 2,4 GHz OEM RF Module"*. Internet, Homepage der Firma MaxStream.
- [MAXSTREAM 2006] MAXSTREAM (2006). *Produktdatenblatt für das ZigBee-Modul "X-Bee"*.
- [MAYS und WESLEY 2003] MAYS und WESLEY (2003). *Method, Apparatus and System for Wireless Data Collection and Communication for Interconnected Mobile Systems, Such As For Railways*. US-Patent US 6,668,216 B2.
- [MINDE und WITTE 2001] MINDE, F. und S. WITTE (2001). *FEBIS: Kommunikationsbasierte elektronisch gesteuerte Bremse*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)*, Bd. 50, S. 256–263.
- [MORTENSEN 1999] MORTENSEN, K. H. (1999). *Automatic Code Generation from Coloured Petri Nets for an Access Control System*. Technischer Bericht, Department of Computer Science, University of Aarhus, Denmark.
- [NANOTRON TECHNOLOGIES 2006] NANOTRON TECHNOLOGIES, GMBH (2006). *Produktbeschreibung des NanoNET TRX-Transceiver-Moduls NA1TR8*.
- [OBER 1998] OBER, B. (1998). *Modellgestützte Synthese ereignisdiskreter Steuerungen*. Dissertation, TU Braunschweig.
- [PETRI 1962] PETRI, C. A. (1962). *Kommunikation mit Automaten*. Dissertation.
- [REICHELTELT 2003] REICHELTELT (2003). *TIPP Solar-Beispielrechnung*. Reichelt Elektronik.
- [RÜGER 2005] RÜGER, B. (2005). *Kombinierter Verkehr als Rettung des Schienengüterverkehrs*. Institut für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen der Technische Universität Wien, Wien, Österreich.

- [RIECKENBERG 2004a] RIECKENBERG, TH. (2004a). *Entwicklung eines Telematiksystems für den Schienengüterverkehr*.
- [RIECKENBERG 2004b] RIECKENBERG, TH. (2004b). *Telematik im Schienengüterverkehr - Ein konzeptionell-technischer Beitrag zur Steigerung der Sicherheit und Effektivität*. Dissertation.
- [RIPLEY 1987] RIPLEY, BRIAN D. (1987). *Stochastic Simulation*. John Wiley & Sons, 1st Aufl.
- [ROYCE 1970] ROYCE, WINSTON (1970). *Managing the Development of Large Software Systems - Concepts and Techniques*. In: *Technical Papers of Western Electronic Show and Convention (WesCon)*.
- [SCHIMANSKI 2003] SCHIMANSKI, M. (2003). *Entwicklung und Erprobung eines Demonstrators für einen drahtlosen Zugbus auf einem realen Versuchsträger*. Diplomarbeit, Institut für elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik, TU Braunschweig.
- [SCHMIDT und HOLZMÜLLER 2002] SCHMIDT, M. und G. HOLZMÜLLER (2002). *Erfahrungen beim Einsatz eines Telematiksystems für Industriebahnen*. In: *Signal und Draht*, Nr. 6, S. 32–35.
- [SCHNIEDER 1993] SCHNIEDER, E. (1993). *Prozeßinformatik - Automatisierung mit Rechensystemen, Einführung mit Petrinetzen*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, 2. Auflage Aufl.
- [SCHNIEDER 1999] SCHNIEDER, E. (1999). *Methoden der Automatisierung: Beschreibungsmittel, Modellkonzepte und Werkzeuge für Automatisierungssysteme*. Vieweg Verlag, Braunschweig / Wiesbaden, 1. Aufl.
- [SCHNIEDER 2007] SCHNIEDER, L. (2007). *Formalisierung von Begriffs- und Modellkonzepten zur Beschreibung von Funktionsimplementierung in Eisenbahnleit- und -Sicherheitssystemen*. In: *21. Verkehrswissenschaftliche Tage*, Dresden. Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List" der TU Dresden und Verband Deutscher Verkehrsunternehmen VDV.
- [SCHOLL et al. 2007] SCHOLL, G., H.-J. KÖRBER und H. WATTAR (2007). *Wieviel Energie braucht Echtzeit? Energieautarke Funksysteme in Echtzeitanwendungen*. atp, (49):64–68.
- [SCHROM 2003] SCHROM, H. (2003). *Realisierung eines optimierten Feldbussystems und Modellierung mit Petrinetzen*. Dissertation.
- [SLOVÁK 2006] SLOVÁK, R. (2006). *Methodische Modellierung und Analyse von Sicherheitssystemen des Eisenbahnverkehrs*. Diplomarbeit, Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der TU Braunschweig.

- [SOLAR 2006] SOLAR, RWE SCHOTT (2006). *Produktdatenblatt für Solarpanels mit EFG-Solarzellen*.
- [SOLARSERVER 2005] SOLARSERVER (2005). *Photovoltaik: Solarstrom und Solarzellen in Theorie und Praxis*.
- [STEINBERG 2002] STEINBERG, S. (2002). *TrainLink Kommunikationskonzept*. Technischer Bericht, Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik. unveröffentlicht.
- [TALKE 2003a] TALKE, W. (2003a). *Seismischer Generator*. Deutschlandpatent DE 103 11 569 A1.
- [TALKE 2003b] TALKE, W. (2003b). *Seismischer Generator und Fahrzeuge mit einem seismischen Generator*. Deutschlandpatent DE 103 11 567 B3.
- [TALKE und WIEMERS 2002a] TALKE, W. und T. WIEMERS (2002a). *Datenübertragungseinrichtungen für einen Wagenverbund*. Deutschlandpatent DE 100 29 126 A 1.
- [TALKE und WIEMERS 2002b] TALKE, W. und T. WIEMERS (2002b). *Datenübertragungseinrichtungen für einen Wagenverbund*. Europapatent EP 1 172 275 A1.
- [TEKCELL] TEKCELL. *Datenblatt TEKCELL SB-D01 Lithium Batterie*. TEKCELL.
- [TIEMANN und JOHNSON 1995] TIEMANN, J. und S. JOHNSON (1995). *Einrichtung zum Umwandeln von Schwingungsbewegung in elektrische Energie*. DE 195 20 521 A1.
- [VARCHMIN und STEINBERG 2005] VARCHMIN, J.-U. und S. STEINBERG (2005). *TrainLink Abschlussbericht*. Technischer Bericht, Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik. unveröffentlicht.
- [VDI3682 2005] VDI3682 (2005). *VDI/VDE 3682: Formalisierte Prozessbeschreibung*. Entwurf.
- [WAGNER 1999] WAGNER, A. (1999). *Photovoltaik Engineering*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [WALKE 2001] WALKE, B. (2001). *Mobilfunknetze und ihre Protokolle 1*. 3 Aufl.
- [WITTE et al. 2001] WITTE, S., R. KLEINSORGE und U. MEIER (2001). *Funkkommunikation im Güterzug*. SIGNAL + DRAHT, 93:26–31.
- [WITTE et al. 2000] WITTE, S., F. MINDE und J. ENGELMANN (2000). *Zentrale Komponenten eines intelligenten Güterzuges*. Eisenbahntechnische Rundschau (ETR), 49(11):745–750.

- [ZETEX 1997a] ZETEX (1997a). *Datasheet Zetex 3,3 Volt ZLDO330 ultra low dropout regulator*. Zetex Semiconductors.
- [ZETEX 1997b] ZETEX (1997b). *Datasheet Zetex 5,0 Volt ZLDO500 ultra low dropout regulator*. Zetex Semiconductors.
- [ZIGBEE-ALLIANCE 2004] ZIGBEE-ALLIANCE (2004). *ZigBee Special Report*. Technischer Bericht, ZigBee Alliance.
- [ZIMMERMANN 2006] ZIMMERMANN, A. (2006). *Stochastic Discrete Event Systems - Modeling, Evaluation, Applications*. Habilitation, TU Berlin.